



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Modelagem do Efeito Raman Espontâneo para Sensoriamento Distribuído de Temperatura

Luís Cicero Bezerra da Silva

Orientadora:

Dr.^a Maria José Pontes

Coorientador:

Dr. Marcelo Eduardo Vieira Segatto

VITÓRIA

FEVEREIRO DE 2017

Luís Cicero Bezerra da Silva

Modelagem do Efeito Raman Espontâneo para Sensoriamento Distribuído de Temperatura

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica. Linha de pesquisa em Telecomunicações e Tecnologia da Informação - TE.

Orientadora: Dr.^a Maria José Pontes

Coorientador: Dr. Marcelo Eduardo Vieira Segatto

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

VITÓRIA
FEVEREIRO DE 2017

Luís Cicero Bezerra da Silva

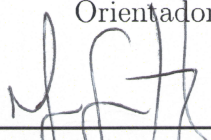
Modelagem do Efeito Raman Espontâneo para Sensoriamento Distribuído de Temperatura

Trabalho aprovado. Vitória, 24 de Fevereiro de 2017

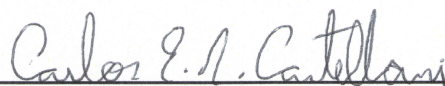
Comissão Examinadora:



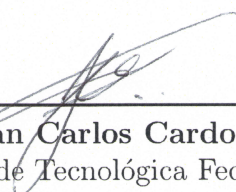
Dr.^a Maria José Pontes
Orientador



Dr. Marcelo Eduardo Vieira Segatto
Coorientador



Dr. Carlos E. Schmidt Castellani
Universidade Federal do Espírito Santo



Dr. Jean Carlos Cardozo da Silva
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

VITÓRIA
FEVEREIRO DE 2017

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)
(Biblioteca Setorial Tecnológica, Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

Silva, Luís Cícero Bezerra da, 1992-
S586m Modelagem do Efeito Raman Espontâneo para Sensoriamento
Distribuído de Temperatura / Luís Cicero Bezerra da Silva. – 2017.
63 f. : il.

Orientador: Maria José Pontes.
Coorientador: Marcelo Eduardo Vieira Segatto.
Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) –
Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. Raman, Efeito – Espalhamento. 2. Modelagem. 3. MATLAB (Programa de Computador). 4. Fibras ópticas. 5. DTS (Sensor de Temperatura Distribuído). I. Pontes, Maria José. II. Segatto, Marcelo Eduardo Vieira. III. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico. IV. Título.

CDU: 621.3

À minha família.

Agradecimentos

Agradeço à Deus pela vida.

Aos professores Maria José Pontes e Marcelo Eduardo Vieira Segatto pela orientação, paciência, e incentivo durante todo o desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus pais pelo carinho e exemplo de vida.

À minha família e amigos, pelo apoio.

À Andreia Fonseca, pela companhia e por toda ajuda.

Aos colegas do Laboratório de Telecomunicações da UFES (LabTel), pelo companheirismo. Em especial, aos amigos: Tiago Duque pelas conversas que contribuíram para o esclarecimento de diversas questões. E Esequiel Pereira pelas contribuições nas simulações realizadas.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica pela oportunidade de realizar o curso de mestrado, pelo espaço de estudo e todo o suporte fornecido.

Ao CNPq e Petrobras pelo apoio financeiro.

*“Viver é conhecer o que nos cerca, a maior virtude de um ser humano é transpor as adversidades desprendendo o mínimo de energia.”
(O Dezertíqola)*

Resumo

O espalhamento Raman espontâneo é um efeito decorrente da interação de um campo eletromagnético com as moléculas do meio no qual o mesmo se propaga. Tal efeito possui forte dependência com a temperatura, encontrando portanto, aplicações em sensoriamento. Neste trabalho a modelagem deste efeito em fibras ópticas para aplicação em sensoriamento distribuído de temperatura é abordada. A princípio foi realizada uma revisão da literatura para levantar os parâmetros fundamentais e posteriormente as equações para gerar o efeito Raman espontâneo foram implementadas em software Matlab. Uma vez definido o modelo sensor proposto, simulações considerando diversos parâmetros e configurações foram analisadas com a finalidade de estudar como tais parâmetros afetam o desempenho do sensor aqui modelado. A partir do perfil de temperatura obtido, o desempenho do sensor foi verificado através do seu alcance, resolução espacial e de temperatura. Dessa forma, este estudo fornece princípios fundamentais de como dimensionar sensores distribuídos de temperatura em fibras ópticas baseados no espalhamento Raman espontâneo. Apresenta-se uma visão otimizada no desenvolvimento de sensores que atendam as necessidades da indústria, principalmente no monitoramento de grandes estruturas, onde o conhecimento de mudanças bruscas de temperatura é fundamental na preservação tanto das áreas monitoradas como principalmente da segurança de pessoas que trabalhem em tais locais.

Palavras-chave: DTS. Espalhamento Raman Espontâneo. Modelagem. OFDR.

Abstract

The spontaneous Raman scattering is an effect caused by the interaction of an electromagnetic field with the molecules of the medium of propagation. This effect is strongly temperature dependent, finding therefore, applications in sensing. In this work, this effect observed in optical fibers is modeled for using in distributed temperature sensing. At first, a review over already studied and reported DTS was carried out, which provided the basic parameters to our analysis. After obtaining such parameters, the equations to reproduce the spontaneous Raman effect were implemented using the software Matlab. Once defined the proposed sensor model, simulations were performed. Various parameters and settings have been extensively analyzed with the purpose of studying how these parameters affect the sensor performance. Special attention was given to the processing of the backscattered signal since it carries the information of temperature along the fiber. The sensor performance was verified through its operation range, spatial resolution and temperature. This study provides fundamental principles of how to design distributed temperature sensors in optical fibers based on spontaneous Raman scattering. Also, it presents an optimized approach to developing sensors that meet the industry's need, especially in the monitoring of large structures, where knowledge of abrupt changes of temperature is critical in preserving the structures and mainly the security of persons working in such places.

Keywords: DTS. Spontaneous Raman Scattering. Modeling. OFDR.

Lista de Figuras

Figura 1 – Previsões do mercado Brasileiro. Fonte: [Research 2016]. Traduzido para o português.	3
Figura 2 – Fenômeno de espalhamento de luz na fibra. Fonte: [Muanenda et al. 2016].	5
Figura 3 – Experimento para obtenção do ERE. Fonte: Elaborado pelo autor.	7
Figura 4 – Possibilidades de análise de um sistema DTS. Fonte: Elaborado pelo autor.	14
Figura 5 – Nível de potência do laser.	15
Figura 6 – Potência retroespalhada para fibras multimodo e monomodo.	16
Figura 7 – Resolução espacial em função da frequência de modulação para OFDR.	17
Figura 8 – Resposta em frequência para 4,7 km de fibra.	18
Figura 9 – Perfil de temperatura em função do comprimento da fibra.	19
Figura 10 – Curva de caracterização do sensor.	19
Figura 11 – Erro na determinação do pico de temperatura na fibra.	21
Figura 12 – Incerteza na temperatura decorrente de mudanças na atenuação.	21
Figura 13 – Dependência da componente AS com a temperatura.	23
Figura 14 – Influência do coeficiente de captura na intensidade do sinal recebido.	24
Figura 15 – Perfil de temperatura no tanque.	25
Figura 16 – Estimando perfil de temperatura aleatório.	27
Figura 17 – Perfil de temperatura no tanque levantado erroneamente.	27

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Comparação entre Sistema Simulado e Sistema Comercial.	26
Tabela 2 – Valores Considerados nas Simulações	36
Tabela 3 – Valores para Simulação no Tanque de Petróleo.	37

Lista de Abreviaturas e Siglas

AS	<i>Anti-Stokes</i>
APD	<i>Avalanche PhotoDiode</i>
DTS	<i>Distributed Temperature Sensor</i>
ENL	<i>Efeitos não lineares</i>
ERE	<i>Espalhamento RAMAN Espontâneo</i>
IFFT	<i>Inverse Fast Fourier Transform</i>
LabTel	<i>Laboratório de telecomunicações</i>
LED	<i>Light Emitting Diode</i>
NWA	<i>Network Analyzer</i>
NA	<i>Numerical Aperture</i>
OFDR	<i>Optical Frequency Domain Reflectometry</i>
OTDR	<i>Optical Time Domain Reflectometry</i>
PD	<i>PhotoDiode</i>
SFOD	<i>Sensores de Fibra Óptica Distribuídos</i>
SNR	<i>Signal-to-Noise Ratio</i>
SRS	<i>Stimulated RAMAN Scattering</i>
S	<i>Stokes</i>
TCA	<i>Taxa de Crescimento Anual</i>
UFES	<i>Universidade Federal do Espírito Santo</i>

Lista de Símbolos

P_{AS}	Potência da componente AS.
\bar{P}_{AS}	Valor médio da potência da componente AS.
A_{AS}	Amplitude da componente AS.
ϕ_{AS}	Fase da componente AS.
P_S	Potência da componente S.
\bar{P}_S	Valor médio da potência da componente S.
A_S	Amplitude da componente S.
ϕ_S	Fase da componente S.
P_i	Sinal da fonte laser.
ω_{mod}	Frequência angular de modulação.
k_{mod}	Número de onda.
n_{gr}	Índice de refração de grupo.
c	Velocidade da luz no vácuo.
Γ_{AS}	Coefficiente de captura da componente AS.
α_{AS}	Coefficiente de atenuação da componente AS.
Γ_S	Coefficiente de captura da componente S.
α_S	Coefficiente de atenuação da componente S.
L	Comprimento total da fibra.
n_{AS}	Fator probabilístico da geração de fótons AS.
$\triangle E$	Diferença de energia entre um fóton de bombeio e um fóton espalhado.
n_S	Fator probabilístico da geração de fótons S.
k	Constante de Boltzmann.
T	Temperatura absoluta.
$T(z)$	Temperatura ao longo da fibra.

R_S	Responsividade do APD para a componente S.
R_{AS}	Responsividade do APD para a componente AS.
$\Delta\alpha$	Diferença entre as atenuações das componentes S e AS.
λ_S	Comprimento de onda da componente S.
λ_{AS}	Comprimento de onda da componente AS.
h_{AS}	Resposta impulsiva da componente AS.
h_S	Resposta impulsiva da componente S.
R_0	Responsividade do fotodiodo PD.
a_0	Fator de atenuação do sinal do laser.
a_{AS}	Fator de atenuação da componente AS.
a_S	Fator de atenuação da componente S.
$R(T)$	Taxa entre as amplitudes das componentes AS e S em uma região da fibra a temperatura que se deseja conhecer.
$R(\theta)$	Taxa entre as amplitudes das componentes AS e S em uma região da fibra a temperatura conhecida.
v'	Número de onda de separação entre o comprimento de onda da luz incidente e o comprimento de onda do espectro espalhado.
h	Constante de Planck.
C	Constante de calibração do sensor.
T_{real}	Temperatura real na fibra.
T_{medida}	Temperatura estimada na fibra.
Δz	Resolução espacial.
$f_{mod,max}$	Máxima frequência de modulação do sinal da fonte laser.

Sumário

1 – Introdução	1
1.1 Objetivo Geral	2
1.1.1 Objetivos Específicos	2
1.2 Perspectivas de Utilização na Indústria	2
1.3 Estrutura da Dissertação	3
2 – Fundamentação Teórica	4
2.1 Sensores em Fibra Óptica	4
2.2 Efeitos não Lineares em Fibras	5
2.2.1 Espalhamento Raman em Regime Espontâneo	6
2.3 Sensores Distribuídos de Temperatura Baseados no ERE	8
2.4 Sistemas DTS Comerciais	10
2.4.1 Limitações	11
3 – Modelagem do Sistema Sensor	12
3.1 Princípios da Modelagem e Simulação de Sistemas	12
3.1.1 Conceitos Envolvidos em Simulação	12
3.1.2 Avaliação Prévia do Sistema em Estudo	13
3.2 Modelando o Sistema DTS	13
4 – Resultados e Discussão	15
4.1 Parâmetros de Entrada	15
4.1.1 Nível de Potência do Laser	15
4.1.2 Tipo de Fibra Óptica	16
4.1.3 Reflectometria Óptica no Domínio da Frequência	17
4.2 Parâmetros de Saída	18
4.2.1 Perfil de Temperatura	18
4.2.2 Resolução de Temperatura	20
4.2.3 Alcance e Resolução Espacial	22
4.3 Avaliação do Modelo quanto Sistema Sensor	23
4.4 Estimativa de Desempenho: Monitoramento em Tanques de Petróleo	24
4.5 Validação do Modelo	26
5 – Considerações Finais	28
5.1 Trabalhos Futuros	29
Referências	30

Apêndices	35
APÊNDICE A–Parâmetros de Entrada	36
APÊNDICE B–Valores para Simulação no Tanque de Petróleo	37
APÊNDICE C–Produção Científica Decorrente da Dissertação	38
APÊNDICE D–Código em Matlab	39

1 Introdução

A segurança de trabalhadores em ambientes classificados como de risco, é um ponto extremamente importante. Para este fim, normas relativas à segurança [Jordão 2002, Bottrill, Cheyne e Vijayaraghavan 2005, Bahadori 2013] têm sido abordadas em trabalhos recentes [Chu 2014, Martins e Azevedo 2014, Sperandio 2015, Girardi 2016]. Neste contexto, sensores distribuídos de temperatura (DTS - *Distributed Temperature Sensors*), que oferecem medições em tempo real de temperatura ao longo de um cabo de fibra óptica tornaram-se uma tecnologia viável no monitoramento em ambientes que oferecem risco à integridade física do trabalhador, tais como temperaturas negativas, ou mesmo temperaturas muito elevadas, uma vez que, tais locais não são totalmente seguros; como por exemplo, instalações subterrâneas ou plataformas de petróleo e gás [Hilgersom et al. 2016, Laarossi et al. 2016].

Sistemas DTS baseiam-se em uma tecnologia já consolidada na indústria, com diversas empresas desenvolvendo soluções tanto no cenário nacional como internacional. Dentre estas, pode-se citar a Halliburton Co., Sensornet Ltd., Innosys Industries, Inc., OFS Fitel Llc, LIOS Technology GMBH, Schlumberger NV, Omnisens SA, Yokogawa Electric Corp., Weatherford, International PLC, Sumitomo Electric Industries Ltd., Omicron Electronics GMBH, Tendeka B.V., AP Sensing GMBH e GESO [Research 2016]. Estas empresas concentram seus pólos na Europa, América do Norte, Ásia-Pacífico, América Latina, Oriente Médio e África [Research 2016].

As soluções desenvolvidas visam aplicações nos setores de produção de petróleo e gás, monitoramento de linhas de distribuição de energia, detecção de vazamentos em gasoduto, detecção de incêndio, entre outros ambientes de risco devido a mudanças bruscas de temperatura [Bao e Chen 2012, Ukil, Braendle e Krippner 2012].

Todavia, os sensores de temperatura desenvolvidos em tais empresas ainda apresentam limitações em termos de alcance, resolução, calibração e dificuldades operacionais [IEEE 2012, Laarossi et al. 2016]. Decorrente disso, o estudo destas limitações em centros de pesquisa é hoje um campo ativo. Sendo encontrado na literatura diversos estudos no intuito de melhorar o desempenho destes sensores.

Neste contexto, surge a motivação deste trabalho, que primeiramente recai na compreensão das limitações atuais dessa tecnologia e posteriormente propor possíveis soluções.

1.1 Objetivo Geral

Contribuir no avanço e continuidade das pesquisas envolvendo sensoriamento distribuído, através de modelagem dos princípios básicos de funcionamento dos sistemas DTS.

1.1.1 Objetivos Específicos

Entre os objetivos específicos deste trabalho pode-se citar a simulação em ambiente Matlab do funcionamento de um sistema DTS baseado no espalhamento Raman espontâneo; visando testar diversas configurações do mesmo. Posteriormente, é analisado o desempenho do sensor modelado através de três parâmetros básicos: alcance, resolução espacial e de temperatura. Outro objetivo específico envolve propor novas aplicações para DTS. E por fim, fornecer princípios básicos para projetar sistemas DTS que contornem as limitações atuais.

Na Seção 1.2 apresenta-se uma visão geral sobre a utilização comercial dos sensores distribuídos e algumas motivações adicionais desse estudo.

1.2 Perspectivas de Utilização na Indústria

O aumento nos investimentos em infraestrutura na indústria de petróleo e gás, juntamente com as iniciativas governamentais para implantar sensores de fibra óptica em vários projetos de construção, são os principais fatores que estão impulsionando o crescimento do mercado global de sensores de fibra óptica distribuídos (SFOD). Previsões indicam que o mercado dos SFOD deverá registrar uma taxa de crescimento anual composta de 10,4% de 2016 a 2026 [Future-Market-Insights 2016]. A Fig.1 ilustra as previsões do mercado Brasileiro dos SFOD para diferentes setores.

O mercado global dos SFOD é segmentado nas tecnologias de sensoriamento baseadas nos espalhamentos Rayleigh, Brillouin e Raman. Além de sensores baseados em interferometria e Grades de Bragg. As aplicações incluem o monitoramento de deformação, vibração acústica, pressão, umidade, temperatura entre outros parâmetros físicos. Tais aplicações estão presentes nas indústrias de petróleo e gás, segurança, energia, infraestrutura de transportes, saúde, entre outros [Future-Market-Insights 2016, Research 2016].

Em 2015, o mercado dos SFOD foi avaliado em 518,2 milhões de dólares. Com a maior participação do mercado norte-americano, sendo este avaliado em 342,1 milhões de dólares. Há uma estimativa de participação de 30,9% no mercado mundial para 2016 [Future-Market-Insights 2016]. Dentre estas tecnologias, os sensores baseados no espalhamento Raman, representou 33,3% da participação no mercado global dos SFOD em 2015. A indústria de petróleo e gás é responsável pela maior quota de utilização de sensores

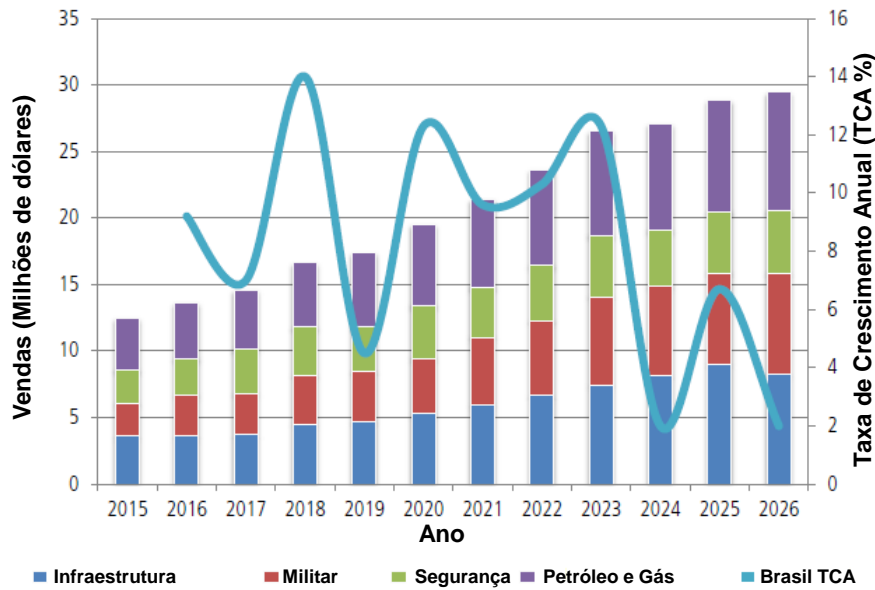


Figura 1 – Previsões do mercado Brasileiro. Fonte: [Research 2016]. Traduzido para o português.

baseados em espalhamento Raman, ocupando 60,9% do mercado mundial. Isto se justifica pelo crescente aumento das operações submarinas nesta indústria que proporcionam oportunidades de crescimento elevado [Future-Market-Insights 2016, Research 2016].

Diante do contexto apresentado, investimentos em pesquisas com SFOD têm crescido nos últimos anos, o que pode ser quantificado pelo número elevado de artigos publicados em periódicos especializados. Isto representa um esforço coletivo de vários pesquisadores em diferentes instituições na busca por solucionar os problemas associados a esta tecnologia. Principalmente no que diz respeito ao desenvolvimento de componentes de custo não elevado.

1.3 Estrutura da Dissertação

Para a apresentação deste trabalho, foi elaborado um texto composto de cinco capítulos, sendo eles [Capítulo 1](#), onde é apresentado o contexto da pesquisa. O [Capítulo 2](#), que descreve conceitos fundamentais para a compreensão do trabalho desenvolvido. [Capítulo 3](#), apresenta as simulações do modelo sensor realizadas neste trabalho. [Capítulo 4](#), contém os principais resultados obtidos, assim como a discussão dos resultados. E por fim, o [Capítulo 5](#) é o espaço destinado a considerações finais.

2 Fundamentação Teórica

2.1 Sensores em Fibra Óptica

Atualmente os sensores em fibra óptica compõem um campo de pesquisa muito ativo em vários grupos e centros de pesquisa. Estes sensores têm se mostrado bastante promissores por vários motivos. Entre eles, pode-se destacar o potencial comercial desta tecnologia, na exploração de diversos parâmetros físicos como temperatura, pressão, tensão, vibração, corrente elétrica, nível, entre outros [Bazzo et al. 2016, Pradhan e Sahu 2015, Shalu et al. 2015, Udd e Spillman 2011, Marignetti et al. 2016, Marques et al. 2016, Laarossi et al. 2016, Hilgersom et al. 2016, Research 2016] .

Entre esta classe de sensores, destacam-se aqueles que baseiam seu funcionamento em grades de difração inscritas na própria fibra [Clement et al. 2016, Carneiro e Barbero 2014, Leandro, Soto e Lopez-Amo 2016, Li, Xu e Kishida 2016], e outros baseados em efeitos não lineares (ENL) [Ukil, Braendle e Krippner 2012, Lopez-Gil et al. 2016, Chang et al. 2016, Angulo-Vinuesa et al. 2016, Bao e Chen 2012]. Neste último tipo, tais ENL mostram-se atrativos para sensoriamento, pois são decorrentes de uma interação natural da luz de alta potência com o meio no qual ela se propaga, permitindo à fibra ser o próprio transdutor nas medidas. Uma vantagem importante é a grande quantidade de pontos de monitoramento que tais sensores possibilitam [Rossetto e Ferreira 2004].

Já os sensores com Grades de Bragg, muito embora apresentem alta sensibilidade, sofrem influência de duas grandezas principais e que são determinadas simultaneamente nas medições: deformação e temperatura, sendo necessário conhecer como cada um desses efeitos interferem na medida do outro. Além disso, a medida discreta dessa classe de sensores inviabiliza sensoriamento de longas distâncias [Neeharika e Pattnaik 2016].

Tais fatores citados dão a esta tecnologia de sensoriamento baseado em ENL uma aplicabilidade na monitoração da “saúde estrutural” de pontes [Ferreira et al. 2006], navios [Friebele 1998], barragens [Bao e Chen 2012], plataformas de petróleo e gás [Pradhan e Sahu 2015].

No âmbito dos sensores baseados em ENL já desenvolvidos e que atendem requisitos relacionados a viabilidade industrial, estão os sistemas DTS baseados no espalhamento Raman espontâneo (ERE) em fibras ópticas.

Na Seção 2.2, aborda-se com maior profundidade a natureza dos ENL em fibras, e como estes podem ser utilizados para interrogar temperatura.

2.2 Efeitos não Lineares em Fibras

À medida que luz de alta potência propaga-se no interior de um cabo de fibra óptica, a mesma sofrerá espalhamento a partir de efeitos tais como espalhamento Raman, Brillouin e Rayleigh (este último com mesma frequência da luz incidente; no entanto, os espalhamentos Raman e Brillouin ocorrem em frequências diferentes da luz incidente). Ao ocorrer mudanças de temperatura, pressão ou deformação em algum ponto da fibra óptica, estes parâmetros físicos irão modular o sinal espalhado [Bao e Chen 2012]. Desta forma, medindo-se esta modulação através da análise do espectro espalhado, pode-se realizar o sensoriamento desses parâmetros ao longo de toda extensão da fibra [Bao e Chen 2012]. Os diferentes efeitos de espalhamento citados podem ocorrer simultaneamente, isto dependendo do limiar de potência para que cada um ocorra.

Assim sendo, se a densidade de energia no núcleo da fibra for tal que, permita a interação dos fótons da luz incidente com as moléculas que constituem o material da fibra (geralmente sílica fundida), ocorrerão trocas de energia entre esses fótons e moléculas que resultará em novos campos eletromagnéticos com frequências diferentes propagando-se em todas as direções [Bao e Chen 2012]. Caso a frequência do sinal espalhado seja menor que a frequência da luz incidente, as moléculas do meio absorvem energia, produzindo fótons espalhados com menor energia. Esse espalhamento é denominado Stokes (S) [Rodrigues e Galzerani 2012].

Neste mesmo contexto, se o sinal espalhado possui frequência maior, quando comparada com a frequência da luz incidente, as moléculas do meio cedem parte de sua energia para os fótons da luz incidente. Isto faz com que sejam gerados fótons com maior energia. Esse espalhamento recebe o nome de Anti-Stokes (AS) [Rodrigues e Galzerani 2012]. Conforme ilustrado na Fig.2.

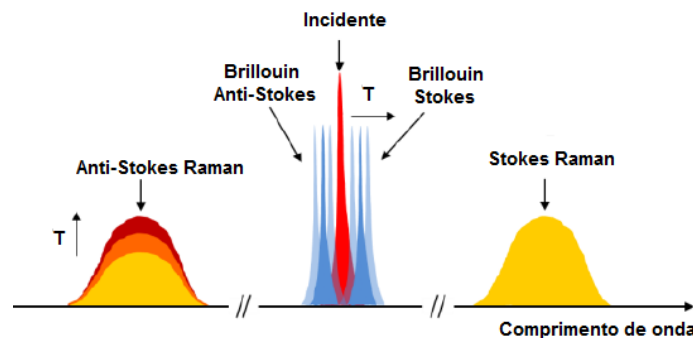


Figura 2 – Fenômeno de espalhamento de luz na fibra. Fonte: [Muanenda et al. 2016].

A Fig.2, ilustra o espectro da luz espalhada na fibra quando a densidade de potência é suficiente para instigar estas não linearidades. Além disso, é ilustrado também o fato que mudanças de temperatura ao longo da fibra, modificam diretamente a intensidade da componente AS do espalhamento Raman e a frequência do espalhamento Brillouin. A

escolha destes efeitos para sensoriamento dependente do parâmetro físico a ser medido; do comprimento do elemento sensor; da sensibilidade do efeito com relação ao parâmetro; ou ainda do objetivo do sistema sensor, que cada não linearidade oferece [Rodrigues e Galzerani 2012].

Para exemplificar a importância da escolha adequada dos ENL, pode-se tomar como objetivo medir apenas temperatura a curtas distâncias. Partindo então deste objetivo, observou-se que, o espalhamento Brillouin possui sensibilidade com mudanças de temperatura e deformação [Song et al. 2016]. Neste caso, é necessário identificar o quanto a temperatura varia com a deformação. Já o espalhamento Raman é sensível apenas a temperatura, tornando-o neste caso uma boa escolha para interrogação de temperatura quando comparado com o espalhamento Brillouin [Bao e Chen 2012].

Ao prosseguir com o exemplo de interrogar temperatura, e determinado o espalhamento Raman como não linearidade a ser explorada. Se ocorrer então, variações de temperatura em pontos específicos na fibra, as moléculas do meio nestes pontos irão absorver parte dessa energia térmica, passando para um estado de maior energia (energia vibracional). Nestas regiões, ocorrerá maior geração de fótons AS, uma vez que as moléculas irão ceder essa energia térmica para os fótons espalhados. Desse modo, se a temperatura na fibra não for constante, resultará em um espectro espalhado modulado pelas alterações de temperatura. Logo, medindo este espectro é possível obter o perfil de temperatura ao longo de toda a extensão da fibra [Bao e Chen 2012].

A determinação precisa do local onde ocorreu uma dada mudança de temperatura, pode ser feita através da reflectometria óptica no domínio do tempo (OTDR - *Optical Time Domain Reflectometry*), ou da reflectometria óptica no domínio da frequência (OFDR - *Optical Frequency Domain Reflectometry*). Todavia a escolha dessas técnicas também influenciará no desempenho dos sensores de temperatura.

Descreve-se, a seguir, o espalhamento Raman espontâneo observado a partir da técnica OFDR. A justificativa de não usar a OTDR recai no fato que a OFDR apresenta melhor resolução e implementação mais simples. Muito embora o alcance do sensor com OTDR seja maior [Karamehmedovic 2006].

2.2.1 Espalhamento Raman em Regime Espontâneo

O espalhamento Raman pode ser tanto espontâneo, quando os fótons espalhados são gerados independentemente de outros fótons; ou estimulado, onde a geração dos fótons é devida a fótons gerados a partir de espalhamento.

Para interrogar temperatura, usa-se apenas o efeito espontâneo. Isto se justifica pelo fato do efeito estimulado degradar a informação de temperatura [Rottwitt et al. 2003, Ribeiro 2011, Karamehmedovic 2006]. A condição para que ocorra o ERE é dada pelo

nível de potência óptica acoplada à fibra. Esses valores de potência serão apresentados com mais detalhes no [Capítulo 4](#).

Quando ocorre o ERE em fibras, o mesmo é espalhado em todas as direções, sendo que apenas uma pequena fração deste espalhamento é capturada e guiada ao longo da fibra [[Karamehmedovic 2006](#)].

A Fig.3 ilustra o aparato experimental para obter o espectro do ERE, que é composto de um laser pulsado, um circulador, a fibra e um detector para o sinal retroespalhado.

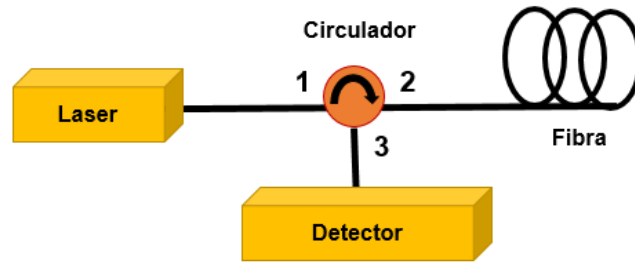


Figura 3 – Experimento para obtenção do ERE. Fonte: Elaborado pelo autor.

A detecção do sinal contra-propagante e não do co-propagante, foi escolhido pelo fato da intensidade do sinal recebido nesta direção ser maior [[Ribeiro 2011](#)]. Além disso, o ERE é composto pelas componentes S e AS, que devem ser separadas no detector, antes de traçar o perfil de temperatura.

A equação que descreve a fração de potência P_{AS} da componente AS capturada e guiada ao longo da fibra é [[Farahani e Gogolla 1999](#)]:

$$P_{AS} = \bar{P}_{AS} + A_{AS} \cos(\omega_{mod}t + \phi_{AS}). \quad (1)$$

Com o valor médio \bar{P}_{AS} , amplitude A_{AS} e fase ϕ_{AS} definidas, respectivamente, por:

$$\bar{P}_{AS} = P_i n_{AS} \Gamma_{AS} \frac{1}{2\alpha_{AS}} [1 - \exp(-2\alpha_{AS}L)], \quad (2)$$

$$A_{AS} = P_i n_{AS} \Gamma_{AS} \frac{\exp(-\alpha_{AS}L)}{\alpha_{AS}L} \frac{\sqrt{\sinh^2(\alpha_{AS}L) + \sin^2(k_{mod}L)}}{\sqrt{1 + (k_{mod}/\alpha_{AS})^2}}, \quad (3)$$

$$\phi_{AS} = -k_{mod}L - \arctan\left(\frac{k_{mod}}{\alpha_{AS}}\right) + \arctan\left(\frac{\tan(k_{mod}L)}{\tanh(\alpha_{AS}L)}\right). \quad (4)$$

Nas equações (1)-(4), P_i se refere ao sinal do laser modulado em amplitude, com frequência angular ω_{mod} e número de onda $k_{mod} = \omega_{mod}n_{gr}/c$. Onde n_{gr} é o índice de refração de grupo do núcleo da fibra e c é a velocidade da luz no vácuo. Γ_{AS} é o coeficiente de

captura do sinal AS, α_{AS} o coeficiente de atenuação deste mesmo sinal, e L o comprimento total da fibra.

Pode-se observar das equações (3) e (4), que o sinal espalhado, possui amplitude e fase bem definidas. É importante detectá-las corretamente para traçar o perfil de temperatura com o mínimo de erro possível [Karamehmedovic 2006].

O termo que representa o fator probabilístico da geração de fótons AS espalhados é governado pela distribuição de Bose-Einstein [Farahani e Gogolla 1999]:

$$n_{AS} = \frac{1}{1 - \exp(-\Delta E/kT)}, \quad (5)$$

sendo ΔE a diferença de energia entre um fóton de bombeio e um fóton espalhado. A grandeza k é a constante de Boltzmann, e T a temperatura absoluta da fibra. Para os fótons Stokes, tem-se:

$$n_S = \frac{\exp(-\Delta E/kT)}{1 - \exp(-\Delta E/kT)}. \quad (6)$$

As equações para a componente S são análogas às apresentadas acima para a componente AS; bastando para tal substituir em (1)-(4) o sub-índice AS por S.

A partir das equações acima, que descrevem como gerar o ERE em fibras, pode-se chegar a expressão que calcula a temperatura ao longo da fibra. A Seção 2.3 discute este passo.

2.3 Sensores Distribuídos de Temperatura Baseados no ERE

Nesta Seção apresentam-se duas formas de obter a informação de temperatura ao longo da fibra, quando o ERE é gerado. Primeiramente, a temperatura pode ser calculada pela resposta impulsiva do sistema [Farahani e Gogolla 1999]:

$$T(z) = \frac{\Delta E}{k \ln \left(\frac{h_S}{h_{AS}} \frac{R_{AS}}{R_S} \frac{\alpha_{AS}}{\alpha_S} \left(\frac{\lambda_S}{\lambda_{AS}} \right)^4 \exp(\Delta \alpha \cdot z) \right)}. \quad (7)$$

Na equação (7), R_S e R_{AS} são as responsividades do fotodiodo APD (*Avalanche PhotoDiode*) para cada componente do sinal espalhado. $\Delta \alpha$ é a diferença entre as atenuações das componentes S e AS. λ_S e λ_{AS} são os respectivos comprimentos de onda para as componentes S e AS. O termo h_{AS} representa a resposta impulsiva da componente AS, dada por [Farahani e Gogolla 1999]:

$$h_{AS} = \text{Re} \left[\frac{R_{AS} a_{AS}}{R_0 a_0} \text{IFFT} \left(\frac{A_{AS}}{P_0} \exp(j\phi_{AS}) \right) \right]. \quad (8)$$

Na equação (8), R_0 e a_0 a responsividade do fotodiodo PD (*PhotoDiode*) e o fator de atenuação respectivamente, para o sinal do laser. E a_{AS} o fator de atenuação do sinal AS devido a separação desta componente com a componente S que compõem o sinal retroespalhado. A fim de obter a resposta impulsiva para a componente S, basta substituir em (8) o sub-índice AS por S.

Uma maneira alternativa para estimar a temperatura na fibra é calcular diretamente a razão entre as amplitudes (ver equação. (3)) das componentes AS e S. Sendo assim definida:

$$R(T) = \frac{A_{AS}}{A_S} = \left(\frac{\lambda_S}{\lambda_{AS}} \right)^4 \exp \left(-\frac{hcv'}{kT} \right), \quad (9)$$

onde v' é o número de onda de separação entre o comprimento de onda da luz incidente e o comprimento de onda do espectro espalhado e h a constante de Planck.

Da equação (9), a temperatura na fibra é definida pela seguinte expressão:

$$T(z) = \left[\frac{1}{\theta} - \frac{k}{hcv'} \ln \left(\frac{R(T)}{R(\theta)} \right) \right]^{-1}, \quad (10)$$

sendo $R(T)$ e $R(\theta)$ as razões medidas em uma região da fibra a temperatura que se deseja conhecer, e outra região com temperatura conhecida, respectivamente.

Neste ponto, vale enfatizar que o uso da componente S [Culshaw e Kersey 2008] ou Rayleigh [Bolognini et al. 2007], tem a função de normalizar a componente AS. Isto permite cancelar parte dos efeitos provocados pela atenuação e perdas locais, que podem afetar a medida da temperatura.

Entretanto, as componentes S e AS por terem frequências distintas, propagam-se na fibra com atenuações diferentes, tornando este princípio de normalização da componente AS não totalmente eficaz. Existem muitas técnicas propostas para superar este problema. Por exemplo, utilizar somente a componente AS [Soto et al. 2011], ou realizar medidas em ambas extremidades da fibra [Giesen et al. 2012]; todavia estes métodos também possuem as suas limitações.

Além disso, o sensor deve ser calibrado para obter um perfil de temperatura que reproduza corretamente os valores práticos medidos. [Karamehmedovic 2006]. Isto é feito incluindo-se o fator C em (7) e (10), que define a constante de calibração do sensor. O valor de C depende das condições de operação do instrumento [Ukil, Braendle e Krippner 2012]. Nesta constante de ajuste, podem ser incluídas perdas provenientes de possíveis emendas, componentes ópticos, entre outras perturbações que interfiram na interrogação

da temperatura [Ukil, Braendle e Krippner 2012]. O fator C pode ser assim definido:

$$C = T_{real} - T_{medida}, \quad (11)$$

onde T_{real} é a temperatura real na fibra, e T_{medida} a temperatura estimada. A calibração deve ser realizada mantendo toda a extensão da fibra a uma mesma temperatura.

Todavia, para garantir precisão na medida da temperatura, a calibração não é suficiente. Existe outro parâmetro muito importante denominado resolução espacial, que define um comprimento mínimo no qual a fibra óptica precisa ser sensibilizada para garantir precisão nas medidas. Em outras palavras, se variações de temperatura ocorrerem em comprimentos inferiores à resolução espacial, a medida da temperatura obtida será menor que a temperatura real. A resolução espacial fica assim definida [Farahani e Gogolla 1999]:

$$\Delta z = \frac{c}{2n_{gr}} \frac{1}{f_{mod,max}}, \quad (12)$$

onde $f_{mod,max}$ é a máxima frequência de modulação do sinal do laser.

Portanto, a possibilidade de medir um fator externo como a temperatura, que age sobre o meio de propagação (neste caso a fibra óptica), através da caracterização do espalhamento Raman em regime espontâneo, fornece o princípio geral para a funcionamento de sistemas DTS [Rossetto e Ferreira 2004].

A seguir na Seção 2.4, descrevem-se os componentes que compõem um DTS comercial e suas principais limitações.

2.4 Sistemas DTS Comerciais

Sistemas DTS comerciais funcionam similarmente ao esquema apresentado na Fig.3. No qual o sinal de um laser é lançado na fibra, e em cada ponto de seu comprimento, ocorrem reflexões deste sinal propagante que sofre alterações com a temperatura local. Parte deste sinal refletido (luz retroespalhada devido ao espalhamento Raman em regime espontâneo), é detectada e processada para levantar o perfil da temperatura na fibra que é continuamente atualizado e apresentado na tela de um computador. Os principais componentes de um DTS comercial são [IEEE 2012]:

A fibra óptica, sendo este o próprio elemento sensor que fornece os dados para constituir o perfil de temperatura ao longo de todo o comprimento da fibra. Podendo esta ser monomodo ou multimodo.

A unidade de processamento optoeletrônica, sendo esta o principal componente de um sistema DTS. Ela abriga todo o hardware e parte do software necessário para gerar, transmitir, receber e analisar o sinal óptico de luz. As principais partes são as

seguintes: O laser ou uma fonte de diodo emissor de luz (LED - *Light Emitting Diode*), os detectores, e o *switch* óptico, se necessário. Além desses, um sistema de aquisição de dados, um microprocessador e cartão de memória para processar o sinal de temperatura versus distância; e por fim uma placa de comunicação para interface com o controlador externo.

O sistema DTS inclui também um controlador, às vezes um computador pessoal portátil, que é usado para interagir com o usuário e para enviar comandos para a unidade de processamento optoeletrônica. Suas principais funções são: fornecer uma interface para selecionar os parâmetros necessários para acionar o instrumento; receber e exibir mensagens de alarme geradas; criar e transmitir sequências de comandos para o instrumento; exibir o perfil de temperatura ao longo do comprimento da fibra; armazenar os dados pertinentes para uso posterior (perfis de temperatura, máximo e mínimo, mensagens de alarme, entre outros).

2.4.1 Limitações

Frequentemente, a escolha de uma dada configuração recai sobre o desempenho e características dos componentes opto-eletrônicos. Entre os principais problemas do projeto de um DTS está a determinação do alcance máximo do sensor quando uma faixa de temperatura a ser medida já está estabelecida e o custo da instalação precisa ser avaliado (atenuação da fibra, número de conectores, etc) [IEEE 2012].

A princípio pode parecer intuitivo aumentar a potência da fonte laser, a fim de obter um melhor desempenho em termos de alcance. Todavia, o orçamento de potência constitui outra limitação para sistemas DTS. Pois, conforme será apresentado no [Capítulo 4](#), há um limite de potência a ser acoplada na fibra. Além disso, como ilustrado na [Fig.3](#) o sinal medido é o contra-propagante, isto implica dizer que o orçamento de potência é calculado como sendo o dobro do alcance especificado no projeto, dado que o sinal percorre a fibra duas vezes (ida e volta) [IEEE 2012].

Os cuidados conhecidos com o manuseio da fibra é um ponto que merece especial atenção durante a instalação do equipamento. Pois, um manuseio inadequado da fibra como rupturas ou perdas pode comprometer o funcionamento do sistema.

3 Modelagem do Sistema Sensor

Neste capítulo é apresentado inicialmente uma introdução sobre a natureza da modelagem e simulação de sistemas, onde são levantados questionamentos tais como: Quais são as características ou parâmetros do sistema a ser modelado? Por que simular o funcionamento do sistema previamente? Quais são os resultados obtidos com e sem a simulação prévia do sistema?

Posteriormente, descreve-se o procedimento realizado neste estudo, com os passos da modelagem realizada em ambiente Matlab. Cujo objetivo inicial foi simular o ERE em fibras e deste levantar o perfil de temperatura ao longo de toda extensão da mesma.

3.1 Princípios da Modelagem e Simulação de Sistemas

Diversos tipos de sistemas, de áreas como Física, Engenharia, Biologia, podem ser estudados via simulações. Muitas pesquisas que envolvem sistemas com variações complexas são hoje modeladas a fim de analisar sua evolução sob determinadas circunstâncias. Assim sendo, conhecer como a modelagem de sistemas funciona é fundamental na compreensão de sistemas dinâmicos.

Antes de iniciar uma modelagem baseada na física ou natureza do sistema, faz-se necessário o conhecimento das propriedades do sistema a ser modelado. Tais propriedades podem ser expressas por equações diferenciais, funções de transferência ou variáveis de estado [Souza e Pinheiro 2008]. Essas expressões possibilitam o estudo de um sistema previamente, antes mesmo de implementar o sistema prático.

3.1.1 Conceitos Envolvidos em Simulação

Uma definição geral do que é simulação é dada por [Pegden e Davis 1992]. Estes autores afirmam que “simulação é o processo de projetar um modelo computacional de um sistema real e conduzir experimentos com este modelo com o propósito de entender seu comportamento e/ou avaliar estratégias para sua operação”.

Portanto, a simulação deve buscar [Goldbarg e Luna 2005] :

1. Descrever o mais próximo possível o comportamento do sistema;
2. Possibilitar a construção de hipóteses acerca das respostas obtidas;
3. Prever o comportamento futuro do sistema.

3.1.2 Avaliação Prévia do Sistema em Estudo

A simulação permite realizar estudos de sistemas ainda em fase de projeto, ou de certas atribuições que sistemas reais ainda não possuam. Isto possibilita o desenvolvimento de projetos antes que se inicie um protótipo ou mudanças em sistemas reais, visto que em muitos casos, projetos após implantados, acabam sofrendo inúmeras alterações [Goldbarg e Luna 2005].

Além disso, simulações com sistemas que dependem de muitas variáveis, é bastante viável. Pois, é possível através de ajustes na simulação colocar o sistema sob diversas circunstâncias e ver como o sistema responde. O que na prática, não seria viável dependendo do sistema.

Pode-se citar também a possibilidade de testar novas situações nas quais o sistema real não seja capaz de executar. Esta talvez seja a principal função de simulações, quando o quesito é o desenvolvimento de novos modelos para sistemas já existentes.

3.2 Modelando o Sistema DTS

Esta Seção apresentará os passos desenvolvidos na modelagem do sistema DTS e considerações importantes acerca do modelo desenvolvido.

A construção do modelo aqui realizada, não teve por prioridade incluir todas as informações sobre dimensões e detalhes de operação do DTS, procurando obter um espelho do sistema real. Procurou-se desenvolver um modelo simples, de fácil interpretação e com parâmetros suficientes para satisfazer os requisitos de funcionamento para o DTS conforme condições de operação especificadas.

Levando-se em consideração esses aspectos, a principal questão levantada no início deste estudo foi como dimensionar sistemas DTS. Dito com outras palavras, quais os parâmetros relevantes na construção de um protótipo sensor de temperatura em fibra baseado no ERE. Diante deste questionamento, foi elaborado um diagrama apresentado na Fig.4 baseado em [Pradhan e Sahu 2015, Farahani e Gogolla 1999], que ilustra as possibilidades de analisar a resposta de um sistema DTS.

A configuração de entrada depende basicamente do alcance do sensor pretendido. Para longas distâncias, é adequado o uso de lasers pulsados, cuja análise é realizada com OTDR. Entretanto, se o objetivo é interrogar curtas distâncias, lasers CW modulados em amplitude são geralmente empregados juntamente com a técnica de detecção OFDR.

Uma vez definido o domínio de análise da saída do DTS, o próximo passo é estabelecer que tipo de processamento (do sinal retroespalhado) fornece o melhor perfil de temperatura. Por fim, de posse da resposta do sensor, seu desempenho é geralmente avaliado por três parâmetros principais. Sendo estes: o alcance do sensor, sua resolução

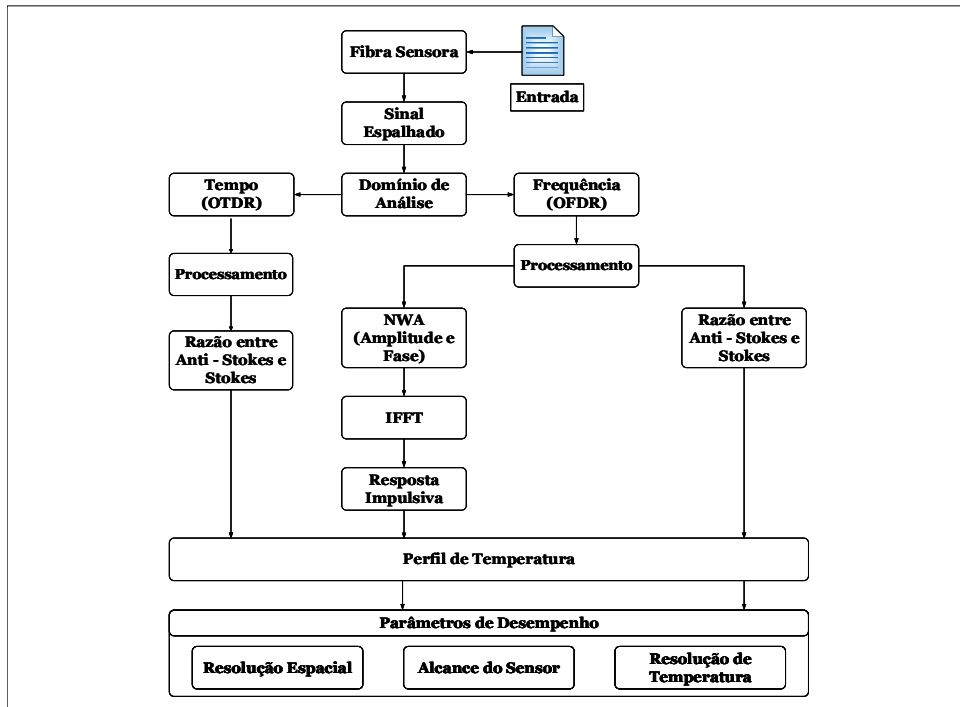


Figura 4 – Possibilidades de análise de um sistema DTS. Fonte: Elaborado pelo autor.

espacial e de temperatura.

Para a análise com OFDR (foco deste trabalho), apresenta-se duas configurações possíveis. A esquerda, mede-se no analisador de rede (NWA -*Network Analyser*), amplitude e fase das componentes S e AS, onde são armazenadas, seguindo da aplicação da Transformada Inversa Rápida de Fourier (IFFT -*Inverse Fast Fourier Transform*) que permite obter a resposta impulsiva do sistema. À direita o perfil de temperatura é calculado somente com a razão entre as amplitudes das componentes AS e S. Isto reduz o processamento dos dados.

No capítulo [Capítulo 4](#), apresentam-se os resultados e a discussão onde são efetuadas comparações entre essas diferentes abordagens.

4 Resultados e Discussão

Este capítulo contém resultados obtidos da modelagem do sistema DTS empregando a técnica OFDR. As limitações observadas no sistema são levantadas e discutidas suas causas e possíveis soluções. Destaca-se que todos os gráficos que serão apresentados neste capítulo foram obtidos do algoritmo desenvolvido.

4.1 Parâmetros de Entrada

Discute-se, nas Seções a seguir, as características dos dispositivos que compõem o sistema sensor e as suas grandezas. Um dos pontos estudados é justamente como a escolha dos parâmetros de entrada no sistema DTS podem influenciar no seu desempenho.

4.1.1 Nível de Potência do Laser

A primeira questão a ser levantada logo no início do estudo, foi o nível de potência da fonte laser a ser lançada na fibra para que o espalhamento Raman gerado estivesse apenas em regime espontâneo (anteriormente nomeado ERE). Dessa forma, o primeiro problema a ser resolvido seria identificar quais níveis de potência são permitidos para um sistema DTS. Segundo [Karamehmedovic 2006], o ERE cresce linearmente com a potência da luz incidente na fibra. Com esta informação, pode-se então delimitar a faixa de potência óptica a ser utilizada para gerar o ERE e suprimir o efeito estimulado (largamente explorado em amplificadores ópticos e lasers em fibra [Al-Khateeb et al. 2016, Gnauck, Jopson e Winzer 2017, Weng, Wang e Pan 2016]), que degrada a interrogação de temperatura [Karamehmedovic 2006, Rottwitt et al. 2003]. Ao calcular esta faixa de potência para a componente AS com (1), obteve-se a curva (linha cheia) mostrada na Fig.5.

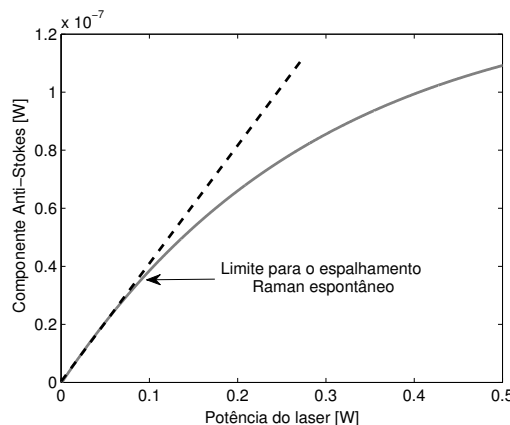


Figura 5 – Nível de potência do laser.

A partir das curvas observadas na Fig.5, pode-se identificar o nível de potência de bombeio a ser lançada na fibra, correspondente a região onde as duas curvas no gráfico se sobrepõem, justamente na região linear entre potência do laser e a componente AS. Isto significa aplicar uma potência com valores abaixo de 100 mW, a fim de gerar apenas o ERE. Este resultado é equivalente aos apresentados em [Karamehmedovic 2006, Farahani e Gogolla 1999]. Dessa forma, utilizar lasers com este limite, permite operar em uma região onde a resposta do sensor é linear com relação a potência incidente. Deve-se considerar, neste caso, que a fonte óptica seja estável. Se durante a instalação do equipamento DTS, o orçamento de potência não for levado em consideração, o desempenho do sistema pode ser comprometido. Todavia, este nível de potência muda com o tipo de fibra empregada (monomodo ou multimodo), conforme discussão a seguir.

4.1.2 Tipo de Fibra Óptica

A intensidade do sinal espalhado é altamente dependente do tipo de fibra utilizada. As fibras monomodo são aquelas utilizadas em sistemas de telecomunicações de longa distância, e a fibra multimodo é usada em aplicações de menor alcance, incluindo redes de área local [IEEE 2012]. A fibra multimodo tem um diâmetro do núcleo de 50 μm ou 62,5 μm , permitindo lançar mais energia na fibra (sem atingir o limiar espontâneo - ver Seção 2.2.1) e portanto, obtêm-se um sinal retroespalhado de maior magnitude. Todavia, fibras monomodo apresentam atenuação muito baixa, permitindo ao sistema monitorar uma distância maior. Nesse contexto, os parâmetros importantes na escolha da fibra são a atenuação e a abertura numérica (NA - *numerical aperture*). A NA afeta diretamente o coeficiente de captura do sinal retroespalhado. Portanto, a intensidade do sinal é maior para fibras multimodo por ter uma maior NA. Porém, em tais fibras, o ERE é fortemente atenuado para longas distâncias de propagação devido a maior atenuação apresentada por essas. A Fig.6 mostra como a amplitude das componentes S e AS são atenuadas para fibras monomodo e multimodo. Observa-se também, que o ERE é detectado com maior intensidade para comprimentos de fibra multimodo inferiores a 1,5 km, tornando tais fibras adequadas para sensoriar curtas distâncias.

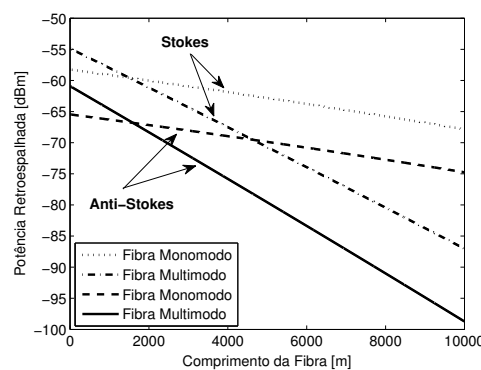


Figura 6 – Potência retroespalhada para fibras multimodo e monomodo.

É pertinente destacar que esta análise em termos do nível de potência a ser detectado no sistema receptor é imprescindível, uma vez que as componentes AS e S possuem baixa amplitude e a detecção das mesmas serem no sentido contra propagante, ou seja, o sinal a ser medido percorre a fibra duas vezes.

A análise também apresenta que devido a baixa atenuação (cerca de 0.2 dB/km) no comprimento de onda de 1550 nm, fibras monomodo tornam-se a melhor escolha para longas distâncias. Portanto, as análises que seguem na subseção 4.1.3, e nas Seções 4.2, 4.3, 4.4 e 4.5 foram realizadas considerando a fibra monomodo padrão.

4.1.3 Reflectometria Óptica no Domínio da Frequência

Geralmente, sistemas DTS comerciais empregam a técnica OTDR, na qual um pulso de curta duração é enviado ao longo da fibra, e o sinal retroespalhado é detectado com alta resolução temporal. O alcance de tais sistemas é tipicamente de 10 km [Bao e Chen 2012]. Esta limitação no alcance do sensor é decorrente das perdas por atenuação ao longo da fibra e a taxa de repetição do laser de bombeio. A mais alta resolução espacial de um sistema DTS baseado no espalhamento Raman e OTDR, chega a 0,24 m com comprimento do sensor de 135 m, e resolução de temperatura de 2,5 °C [Bao e Chen 2012]. Entretanto, características tais como, a necessidade de pulsos de curta duração com alta potência de pico; largura de banda requerida da ordem de GHz e eletrônica rápida; tornam os sistemas sensores baseados em OTDR caros e de implementação complicada [Bao e Chen 2012, Karamehmedovic 2006].

Uma alternativa para sistemas DTS é explorar a técnica OFDR. Nesta técnica, a fonte laser é modulada em amplitude, de forma que a cada incremento na frequência é obtido um valor para a amplitude e/ou fase do sinal retroespalhado [Bao e Chen 2012].

A Fig.7 mostra o compromisso existente entre a resolução espacial e a frequência de modulação obtida a partir da equação (12).

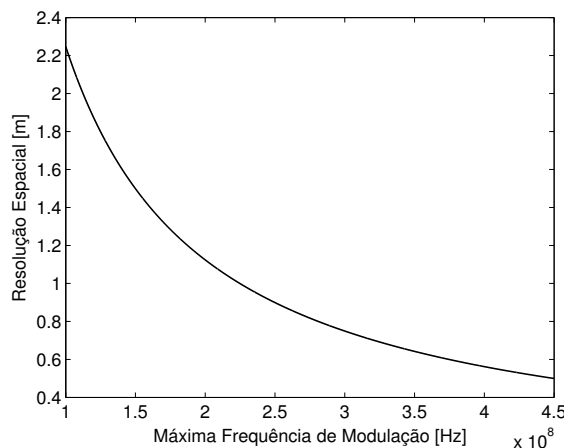


Figura 7 – Resolução espacial em função da frequência de modulação para OFDR.

Observa-se que para obter resolução espacial inferior a 1 m, é necessário operar com frequências de modulação que alcancem centenas de MHz. Porém, para esses valores de frequência, o sinal retroespalhado apresenta forte atenuação, conforme ilustra a Fig.8.

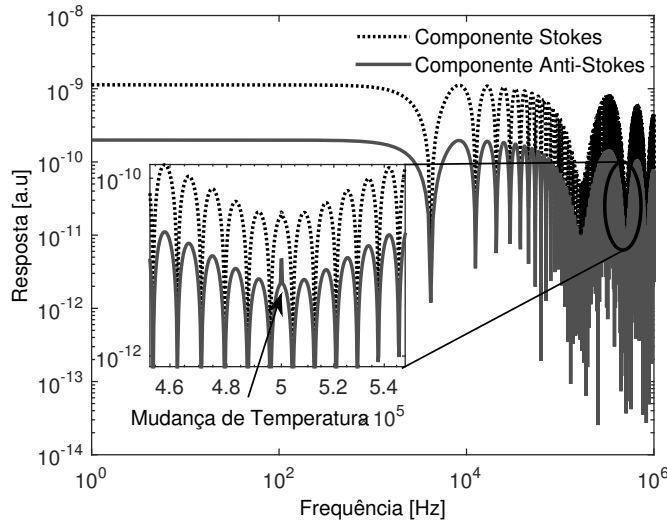


Figura 8 – Resposta em frequência para 4,7 km de fibra.

Além disso, a análise no domínio da frequência mostra em qual componente de frequência ocorrem mudanças de temperatura. A Fig.8 permite identificar um ponto quente na fibra, observado na frequência de 0.5 MHz. Pode-se observar, no espectro ampliado inserido na Fig.8, a dependência maior da componente AS com a temperatura, quando comparada com a componente S. É importante mencionar que, a tecnologia OFDR fornece uma resolução espacial que não muda ao longo de toda a fibra. Isto porém não ocorre com a técnica OTDR, visto que a dispersão alarga a resolução espacial ao longo da distância [LIOS-TECHNOLOGY® 2016].

4.2 Parâmetros de Saída

Definido os parâmetros de entrada, pode-se analisar como estes interferem no desempenho do sistema, ou seja, em sua saída. Nesta Seção será abordado parâmetros básicos comumente encontrados em sistemas DTS, tomando por base os dados fornecidos no Apêndice A. A princípio, apresenta-se o perfil de temperatura obtido para uma fibra monomodo como um resultado de saída do sistema DTS.

4.2.1 Perfil de Temperatura

A Fig.9 ilustra o perfil de temperatura ao longo da fibra para várias curvas medidas e simuladas considerando um único ponto quente na fibra de 50 °C, e o restante da fibra a uma mesma temperatura de 21 °C. As curvas referentes aos perfis de temperatura indicadas

como Simulados 1 e 2 foram obtidas através de (7) e (10), respectivamente; e comparadas com a resposta de um DTS comercial modelo AP Sensing N4385B [Bazzo et al. 2016]. Este resultado mostra que calcular a temperatura diretamente pela razão entre as amplitudes das componentes AS e S com (10), permite melhor precisão na determinação do pico de temperatura. Esta forma de obter o valor de temperatura não necessita do conhecimento da resposta impulsiva do sistema, conforme apresentado por [Farahani e Gogolla 1999]. Isto portanto confirma a simplicidade do uso do ERE para sensoriamento de temperatura. Pois, uma vez conhecida a amplitude do sinal retroespalhado pode-se levantar o perfil de temperatura completo.

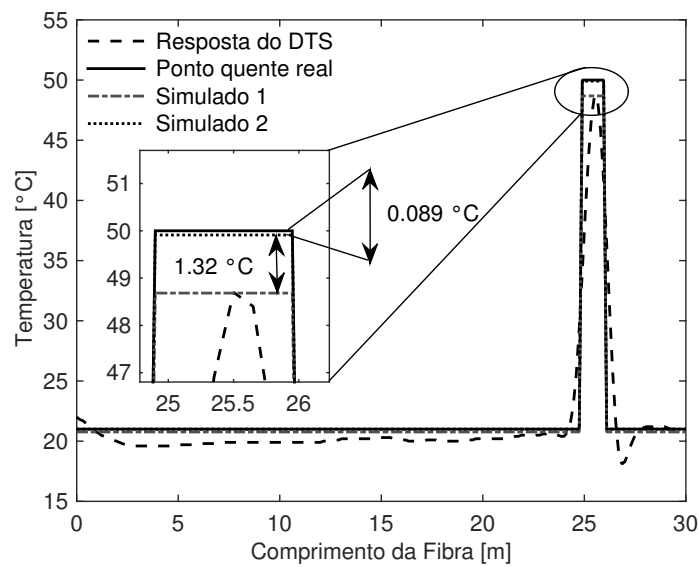


Figura 9 – Perfil de temperatura em função do comprimento da fibra.

A curva de caracterização do sensor, apresentada na Fig.10, pode ser usada para determinar $R(T)$.

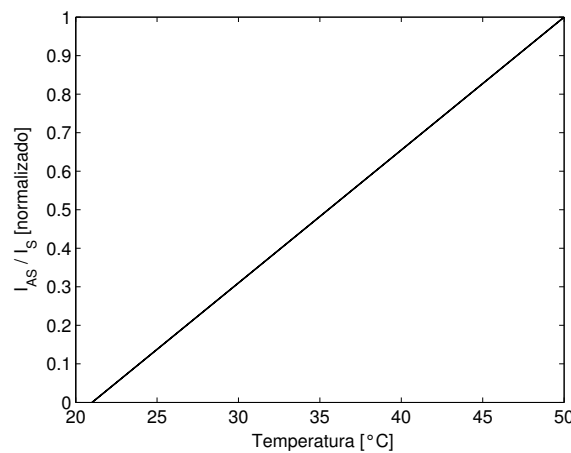


Figura 10 – Curva de caracterização do sensor.

4.2.2 Resolução de Temperatura

A resolução de temperatura pode ser entendida como a incerteza na informação de temperatura lida, ou seja, a diferença entre a temperatura real e a estimada pelo sensor (definição esta usada neste trabalho) [IEEE 2012]. Pode-se afirmar que um dos principais fatores que aumentam esta resolução é o alcance do sensor. Esta limitação é facilmente entendida, pois a medida que o sinal se propaga na fibra, o mesmo experimenta uma atenuação que degrada, portanto a relação sinal/ruído (SNR-*Signal-to-Noise Ratio*).

Na literatura há diversos trabalhos que apresentam como melhorar a SNR. Além disso, em [Farahani e Gogolla 1999] é feita uma análise entre tipos de fibras com diferentes comprimentos de onda, onde se verifica como estes fatores afetam o desempenho do sistema. Neste estudo, a resolução de temperatura para fibras monomodo, empregando um laser emitindo em 1550 nm e 75 mW foi 2,4 K.

Já [Soto et al. 2012] apresenta uma melhora neste parâmetro usando somente a componente AS. Esses autores demonstraram experimentalmente como esta técnica permite compensar o impacto de perdas decorrentes da diferença de comprimento de onda das componentes AS e S, representando uma alternativa aos sistemas DTS baseados na tradicional razão AS/S. Além disso, uma melhoria da SNR e portanto, da resolução também foi apresentada e validada experimentalmente. Todavia, medidas foram realizadas em ambas as extremidades da fibra, o que reduz o alcance do sensor pela metade.

Enquanto que, na análise realizada por [Muanenda et al. 2016], traz uma abordagem como o tempo de resposta interfere na resolução de temperatura. Podemos ainda citar outros trabalhos que avaliam diferentes formas de melhorar a resolução de temperatura [Karamehmedovic 2006, Bolognini et al. 2007, Pradhan e Sahu 2015].

Neste contexto, procurou-se identificar quais fatores além dos citados acima afetam a resolução de temperatura e como estes podem estar correlacionados. Assim sendo, foram realizadas diversas simulações variando os valores dos termos que compõem as equações que descrevem o ERE (ver Seções 2.2.1 e 2.3).

Como resultado dessas simulações, apresentou-se inicialmente na Fig.9 o perfil de temperatura obtido, onde a temperatura do ponto quente foi fixada em 50 °C. Vemos portanto, que a incerteza na medida foi de 0,089 °C. Contudo, ao variar a temperatura do ponto quente para diferentes valores de atenuação das componentes AS e S; obtemos a curva apresentada na Fig.11; que fornece um limite de temperatura para sistemas DTS. O resultado das simulações mostram que para erros inferiores a 0,5 °C deve-se operar com medidas de temperatura inferiores a 240 °C.

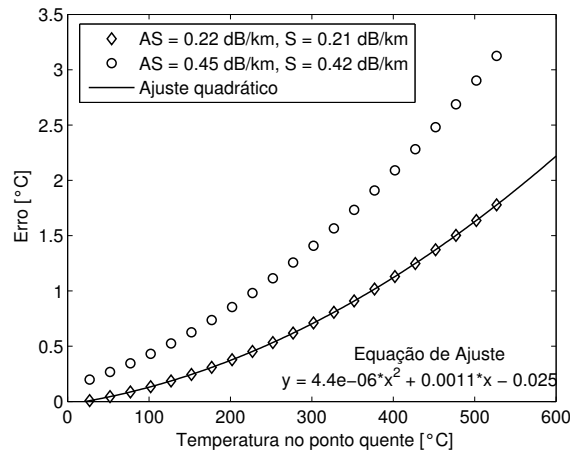


Figura 11 – Erro na determinação do pico de temperatura na fibra.

Muito embora em sistemas de telecomunicações a atenuação seja considerada constante para um determinado comprimento de onda [Senior e Jamro 2009, Agrawal 2002]. Para sensoriamento, esta consideração pode induzir erros no parâmetro interrogado, uma vez que flutuações de alguns décimos na atenuação influenciam na medida da temperatura. A Fig.12 mostra o erro gerado (0,18 °C) quando ocorre uma mudança local na atenuação de 1 décimo do seu valor.

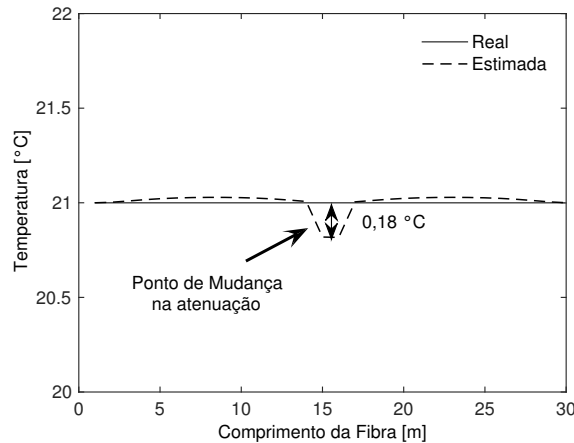


Figura 12 – Incerteza na temperatura decorrente de mudanças na atenuação.

Concluí-se que ao submeter a fibra a altas temperaturas, e se nessa condição, ocorrer mudanças na atenuação em pontos específicos (devido a curvaturas, por exemplo), a incerteza nas medidas tornam-se ainda maiores. Isto indica uma dependência da temperatura com a atenuação. Para evitar este tipo de problema, é necessário realizar testes em ambas as extremidades da fibra no momento da instalação do sensor, a fim de detectar perdas ópticas ao longo de todo o enlace.

4.2.3 Alcance e Resolução Espacial

Para sistemas DTS baseados em OTDR, existe um compromisso entre o alcance do sensor e sua resolução espacial. Uma vez que a dispersão cromática alarga esta resolução com a distância [Karamehmedovic 2006]. Em outras palavras, como a dispersão cromática é o espalhamento do pulso que ocorre dentro de um modo único decorrente das variações do índice de refração do constituinte núcleo em uma função do comprimento de onda. E as componentes AS e S possuem comprimentos de onda diferentes [Keiser 2014]. Isto resulta que ao tomar a razão entre essas componentes, tomam-se valores para cada uma que não faz corresponder à mesma posição na fibra, não apenas deslocando o ponto quente da sua real posição, além de possíveis ondulações (*ripple*) nas bordas serem observadas [Karamehmedovic 2006, Rossetto e Ferreira 2004].

Em [Bazzo et al. 2016] foi proposto uma técnica baseada na deconvolução de algoritmos a fim de melhorar a resolução espacial. O modelo desenvolvido nesse trabalho realiza a convolução do perfil de temperatura real com a resposta impulsiva do sistema DTS. A principal vantagem dessa abordagem, está na capacidade de reconstruir corretamente regiões quentes com dimensões de apenas 15 cm. Entretanto, os experimentos foram conduzidos com uma temperatura máxima de 50 °C.

Conforme as análises apresentadas na Fig.11, sugerimos que esta resolução seja degradada para altas temperaturas de medição (acima de 240 °C). Muito embora, ainda não tenha sido realizados testes que confirmem esta hipótese. O estudo realizado por [Laarossi et al. 2016] com uma temperatura de 450 °C, apresentou um erro considerável de 7,2 °C. Este resultado corrobora com os dados obtidos e apresentados na Fig.11.

Ainda neste contexto, é importante destacar que com as simulações onde considerou-se a temperatura no ponto quente de 50 °C e no restante da fibra 21 °C (ver Fig.9), obtemos uma resolução espacial muito próxima de sistemas DTS comerciais (1 m), com um valor de 0,96 m para 30 m de fibra. O que mostra o bom acordo entre o modelo do sistema DTS simulado neste trabalho e um sistema DTS real. Isto é, quando os parâmetros do sistema são escolhidos adequadamente.

Em resumo, os resultados apresentados nesta Seção indicam que sensores DTS apresentam uma limitação em termos da temperatura de medição, além desta estar correlacionada com mudanças locais na atenuação na fibra, o que não foi encontrado em estudos sobre o tema. Portanto, é relevante realizar novas investigações com mais detalhes a respeito da relação entre mudanças de temperatura e atenuação ao longo da fibra e como estas agindo simultaneamente podem interferir no desempenho de um sistema DTS.

4.3 Avaliação do Modelo quanto Sistema Sensor

Durante toda a realização deste estudo, buscou-se identificar limitações em sistemas DTS, afim de estudar suas causas e propor possíveis soluções. Neste cenário, identificamos dentre as principais limitações do uso do ERE para sensoriamento, a baixa intensidade do sinal, como apresentado na Fig.13 ao calcular a amplitude da componente AS variando-se a temperatura ao longo de toda extensão da fibra.

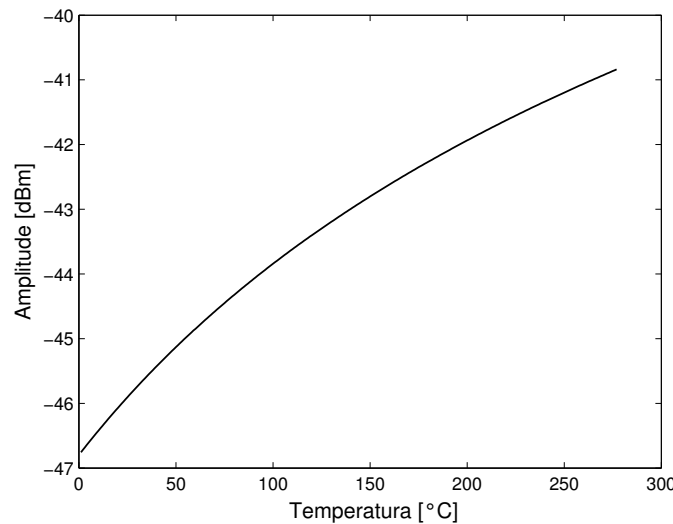


Figura 13 – Dependência da componente AS com a temperatura.

Este resultado indica a necessidade de um amplificador adequado no sistema sensor. Todavia, o mais importante neste ponto, foi o seguinte questionamento levantado: qual elemento é responsável por níveis de potência tão baixos do sinal retroespalhado?

A fim de encontrar uma resposta para essa pergunta, várias simulações foram realizadas exaustivamente analisando as equações que descrevem o ERE, principalmente a amplitude das componentes AS e S (ver equação (3)). Mas, antes de apresentar possíveis respostas a este questionamento, têm-se por exemplo, alguns fatores que influenciam na amplitude do sinal retroespalhado. Primeiramente, destacou-se a partir da Fig.5 (página 15) que não é possível aumentar a potência da fonte laser, pois isso gera o SRS. Além disso, da Fig.8 (página 18), pode-se observar que a amplitude do sinal é fortemente influenciada pela frequência de modulação. Porém, estas informações ainda não são suficientes para responder o questionamento apresentado no início desta Seção.

Contudo, ao finalizar as simulações, encontrou-se ser o coeficiente de captura (Γ) (ver eq.(3)), o responsável por deter maior influência sob o sinal retroespalhado. A Fig.14, ilustra essa dependência.

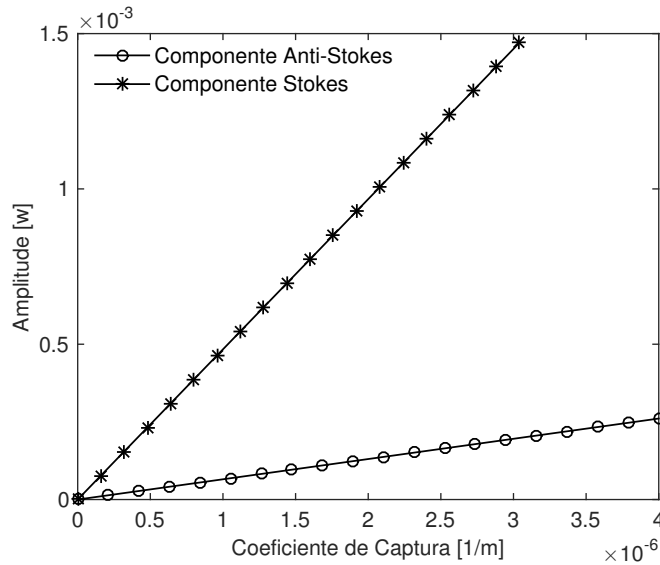


Figura 14 – Influência do coeficiente de captura na intensidade do sinal recebido.

Portanto, ao modificar Γ (o que na prática requer um estudo aprofundado), a intensidade das componentes AS e S mudam cinco e quatro ordens de grandeza, respectivamente, o que não aconteceu ao modificar nenhum outro termo que descreve estas amplitudes. Com valores de Γ acima de $3 \cdot 10^{-6} \text{ m}^{-1}$ é possível obter níveis para o sinal retroespalhado de $1,5 \text{ mW}$. Tal resultado pode indicar uma possível direção na solução da baixa intensidade dessas componentes, uma vez que Γ , está diretamente relacionado com NA. Utilizar (ou mesmo fabricar) fibras com alta NA para aplicação em curtas distâncias de sensoriamento oferece uma abordagem interessante a ser estudada mais profundamente.

4.4 Estimativa de Desempenho: Monitoramento em Tanques de Petróleo

Como abordado na Seção 1.2, o sensoriamento distribuído tem crescido nos últimos anos, principalmente no setor de óleo e gás, visto a necessidade de monitoramento permanente de poços (inclusive durante sua perfuração). SFOD estão se tornando essenciais para a gestão e acumulação de recursos energéticos, aumentando a demanda entre nações e empresas para desenvolver SFOD como uma medida de economia de custos. Nesse contexto, foram realizadas simulações, considerando o desempenho de um sistema DTS no monitoramento de temperatura em um tanque de petróleo. Ao aplicar os parâmetros considerados neste estudo, com uma configuração que melhor se adequa ao monitoramento de um tanque com dimensões padrão (os passos seguidos foram os mesmos apresentados na Fig.4), utilizado na armazenagem de óleo e gás, o perfil de temperatura foi levantado, conforme simulação realizada com a equação (10), e mostrado na Fig.15.

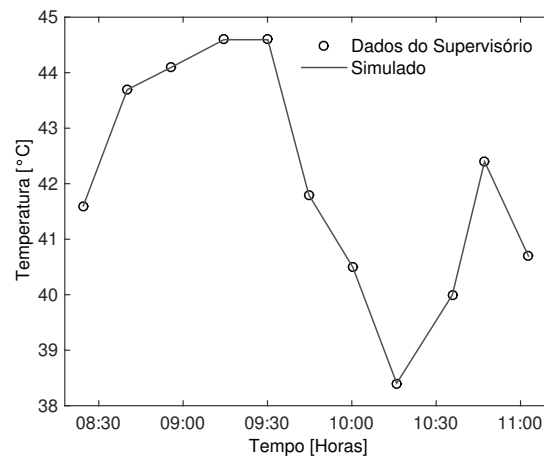


Figura 15 – Perfil de temperatura no tanque.

O modelo implementado permitiu simular um sistema DTS que apresentou uma resolução de temperatura de $0,0259\text{ }^{\circ}\text{C}$, resolução espacial de $0,22\text{ m}$; além de poder ser usado em aplicações com um alcance máximo de até $22,48\text{ m}$. O estudo feito, levaram a resultados consistentes e que reproduzem valores típicos desses sistemas DTS. Além disso, o sensoramento não se restringe a apenas um único tanque. Pode-se instalar o sensor em vários tanques, formando uma malha sensora, e o perfil de temperatura em toda estrutura ser analisado com segurança em uma cabine de monitoramento. Isto mostra uma das vantagens do sensoramento distribuído. A tabela 3 no [Apêndice B](#) contém os valores usados na simulação desta Seção.

4.5 Validação do Modelo

Segundo [Harrell, Ghosh e Bowden 2011], todo processo de modelagem está propenso a erros, acarretando na não representatividade do sistema ou situação para a qual foi projetada. Neste caso, a validação do modelo é essencial para minimizar a existência de tais erros. Sendo esta definida por [Law 2008] como o processo que determina se o modelo de simulação é suficientemente preciso para representar o sistema real, diante dos objetivos do estudo. Nesse contexto, [Jain 1991, MEDINA e CHWIF 2007] destacam duas características importantes da validação de simulações. Primeiramente, não existe uma maneira de validar 100 % um modelo. Além disso, não há como garantir que este está totalmente livre de erros. Ademais, para [Balci 2003] a validação de uma modelagem não pode ser considerada uma variável binária, onde o modelo é absolutamente correto ou errado. Para este autor, o modelo deve ser construído em conformidade com as metas do projeto.

Algumas técnicas de validação são mais subjetivas, usando a experiência de especialistas para verificar uma determinada simulação. Entretanto, esta abordagem dificilmente garante que o modelo seja válido. Um levantamento estatístico, ou a comparação com dados fornecidos por sistemas reais, são geralmente empregados nessas análises [Leal et al. 2011, Yang, Potter e C 2007].

Diante do que foi abordado, a validação do modelo aqui desenvolvido foi realizada comparando as respostas das simulações e de um DTS comercial (modelo AP Sensing N4385B) com o perfil de temperatura real. Conforme ilustra a tabela 1.

Tabela 1 – Comparação entre Sistema Simulado e Sistema Comercial.

Sistema	Temperatura	Erro
Dado real	50 °C	—
Comercial	48,70 °C	1,30 °C
Simulado 1	48,68 °C	1,32 °C
Simulado 2	49,91 °C	0,09 °C

A tabela 1 contém apenas alguns dados apresentados ao longo de todo o capítulo Capítulo 4, que representa a validade do modelo desenvolvido. Onde dados determinísticos foram usados. A fim de analisar o comportamento do sistema para uma admissão estocástica, foi usada uma fonte geradora de números aleatórios como a entrada do sistema, ou seja, a temperatura que o modelo precisa estimar. O resultado é apresentado na Fig.16, com uma incerteza na medida inferior à 0,025 °C.

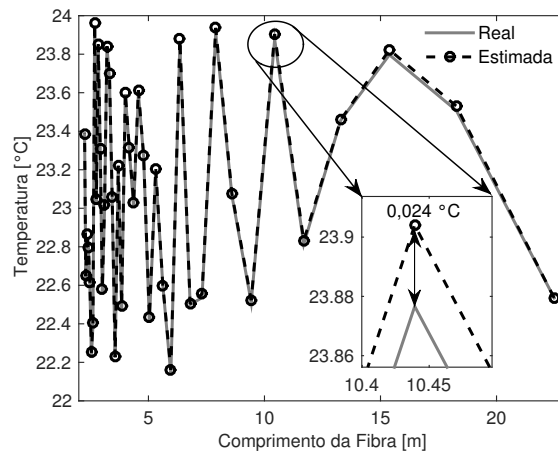


Figura 16 – Estimando perfil de temperatura aleatório.

Além disso, para mostrar que uma escolha não apropriada de parâmetros pode afetar bruscamente a temperatura estimada, ilustra-se na Fig. 17 o que ocorre se é usado por exemplo uma baixa frequência de modulação (dezenas de Hz), referente ao caso apresentado na Seção 4.4.

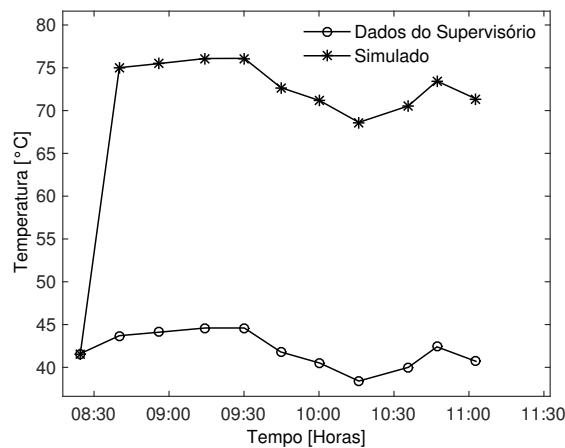


Figura 17 – Perfil de temperatura no tanque levantado erroneamente.

Em síntese, pode-se afirmar que o modelo funciona de maneira bastante satisfatória, desde que os parâmetros de entrada no sistema sejam adequadamente escolhidos.

5 Considerações Finais

Neste trabalho foi desenvolvido um conjunto de simulações em ambiente Matlab, de um sistema DTS, baseado no ERE. Uma descrição da natureza do ERE em fibras e sua aplicação para sensoriamento de temperatura foi apresentada.

Buscou-se compreender as principais limitações dos sistemas DTS, visto já ser uma tecnologia comercializada. Onde foram posteriormente levantados os parâmetros que estão relacionados com estas limitações, no intuito de propor configurações alternativas para esta classe de sensores.

A princípio, o sistema modelado foi analisado sob diversos parâmetros de entrada. Tais como, nível de potência da fonte laser, faixa de frequência e comprimento do elemento sensor. As simulações realizadas com ênfase na técnica OFDR permitiram identificar que o desempenho do sensor é fortemente comprometido por flutuações na atenuação do sinal retroespalhado, do coeficiente de captura, do nível de potência do laser, da frequência de modulação, do limite de temperatura monitorado, e do processamento do sinal para levantar o perfil de temperatura.

Das considerações acerca da atenuação, estas sugerem dispor a fibra de forma que se evite emendas e curvaturas acentuadas, uma vez que pequenas flutuações na atenuação do sinal podem aumentar a incerteza na temperatura lida.

Pelo estudo realizado, identifica-se que o principal elemento que interfere na intensidade do sinal recebido é o coeficiente de captura do mesmo. Este está diretamente relacionado com a NA da fibra, ficando portanto, dependente do tipo de fibra utilizada. As fibras multimodo por apresentarem um maior coeficiente de captura, proporcionam um espalhamento com maior intensidade. Este resultado indica uma direção na solução da baixa intensidade das componentes AS e S. Para tal, fabricar fibras com maior NA. Entretanto, por uma questão de custo, esta alternativa talvez não seja viável. Uma vez que os principais componentes ópticos desenvolvidos não são compatíveis para fibras multimodo. Todavia, uma investigação mais detalhada pode substituir a necessidade de amplificadores no sistema, melhorando não apenas o desempenho do sensor, mais também seu custo.

O nível de potência do laser também foi estudada, confirmando não somente resultados já encontrados em literaturas sobre o tema, mais também estabelecendo uma região de comportamento linear entre a potência do laser e a potência da componente AS.

Uma alternativa para evitar que o sinal seja fortemente atenuado é operar com frequências de modulação na faixa de dezenas ou centenas de KHz, sendo esta análise válida com OFDR. A justificativa na escolha do domínio de análise adotado nas simulações,

recai no fato do OTDR não apresentar uma melhor resolução de temperatura e espacial, quando comparadas com as oferecidas com OFDR. Mesmo o OTDR apresentando um bom desempenho para sensoriar grandes distâncias.

Além disso, as simulações mostraram que a incerteza nas medidas tornam-se maiores para altas temperaturas, indicando uma limitação operacional para sistemas DTS em termos de temperatura. Uma vez que normas e regulamentos estabelecem uma determinada resolução de temperatura em aplicações específicas. Os dados obtidos revelam que para erros inferiores a $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ deve-se operar com medidas de temperatura abaixo a $240\text{ }^{\circ}\text{C}$.

No que diz respeito ao processamento do sinal retroespalhado, para extrair dele a informação de temperatura; ao analisar as equações que representam o comportamento do ERE, têm-se que o mesmo apresenta uma fase e uma amplitude bem definidas e dependentes da temperatura na fibra. Os resultados indicam que a utilização apenas da amplitude do sinal é suficiente para estimar o perfil de temperatura, a partir da taxa entre as componentes AS e S, conforme abordado. Todavia, não foram realizados estudos suficientes que confirmem este resultado. Contudo, não obter a informação de fase das componentes AS e S reduz a quantidade de dados processados, e consequentemente, a complexidade do sistema.

Em termos de novas aplicações para sistemas DTS, pesquisas sobre a utilização comercial de sistemas sensores indicam forte crescimento do uso de DTS na indústria de óleo e gás. Diante desse cenário, simulações mostram que o sensor aqui modelado pode ser utilizado para monitorar a temperatura em tanques de petróleo, onde um perfil aleatório de temperatura pode ser obtido com incerteza inferior a $0,03\text{ }^{\circ}\text{C}$. Tal monitoramento adequadamente aplicado, pode fornecer informações de temperatura em tempo real ao usuário que permitirão ajustar os limites atuais para condições contínuas e de emergência.

Portanto, este trabalho cumpriu os objetivos traçados para este estudo, onde foram levantados um conjunto de dados diversos que auxiliam na compreensão de como fatores acima citados interferem na interrogação de temperatura. Apresentando possíveis abordagens para projetar configurações práticas no dimensionamento de sistemas DTS.

5.1 Trabalhos Futuros

Como continuidade deste trabalho, novas simulações com diferentes valores dos parâmetros aqui testados (ou novos) podem ser realizadas.

Testes experimentais podem ser propostos no intuito de melhor explicar as questões aqui levantadas. Além disso, abordagens específicas para contornar a baixa intensidade das componentes AS e S ou técnicas alternativas de detecção são relevantes e merecem estudos adicionais.

Referências

AGRAWAL, G. Fiber-optic communication systems. *John Wiley, New York*, 2002. Citado na página [21](#).

AL-KHATEEB, M. A. Z. et al. Four wave mixing in distributed Raman amplified optical transmission systems. In: *IEEE Photonics Conference (IPC)*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 795–796. Citado na página [15](#).

ANGULO-VINUESA, X. et al. Limits of BOTDA Range Extension Techniques. *IEEE Sensors Journal*, v. 16, n. 10, p. 3387–3395, May 2016. Citado na página [4](#).

BAHADORI, A. *Hazardous area classification in petroleum and chemical plants: a guide to mitigating risk*. [S.l.]: CRC Press, 2013. Citado na página [1](#).

BALCI, O. Verification, validation, and certification of modeling and simulation applications: verification, validation, and certification of modeling and simulation applications. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE. *Proceedings of the 35th conference on Winter simulation: driving innovation*. [S.l.], 2003. p. 150–158. Citado na página [26](#).

BAO, X.; CHEN, L. Recent progress in distributed fiber optic sensors. *Sensors, Molecular Diversity Preservation International*, v. 12, n. 7, p. 8601–8639, 2012. Citado 5 vezes nas páginas [1](#), [4](#), [5](#), [6](#) e [17](#).

BAZZO, J. et al. Improving Spatial Resolution of Raman DTS Using Total Variation Deconvolution. *IEEE Sensors Journal*, v. 16, n. 99, p. 1–1, 2016. Citado 3 vezes nas páginas [4](#), [19](#) e [22](#).

BOLOGNINI, G. et al. Analysis of distributed temperature sensing based on Raman scattering using OTDR coding and discrete Raman amplification. *Measurement Science and Technology*, IOP Publishing, v. 18, n. 10, p. 3211, 2007. Citado 2 vezes nas páginas [9](#) e [20](#).

BOTTRILL, G.; CHEYNE, D.; VIJAYARAGHAVAN, G. *Practical electrical equipment and installations in hazardous areas*. [S.l.]: Newnes, 2005. Citado na página [1](#).

CARNEIRO, A. C.; BARBERO, A. P. L. Princípio de Funcionamento dos Sensores Ópticos Baseados em Grades em Fibras Ópticas e sua Importância nas Diferentes Áreas Tecnológicas. *ENGEVISTA*, v. 16, n. 4, p. 389–403, 2014. Citado na página [4](#).

CHANG, H. Q. et al. DBA-Based BOTDA Using Optical Comb Pump and Pulse Coding With a Single Laser. *IEEE Photonics Technology Letters*, v. 28, n. 10, p. 1142–1145, May 2016. Citado na página [4](#).

CHU, J. N. *Análise de riscos nas indústrias petroquímicas: atmosferas explosivas*. Tese (Doutorado) — Escola Superior de Ciências Empresariais, 2014. Citado na página [1](#).

CLEMENT, J. et al. Interrogation of a Sensor Array of Identical Weak FBGs Using Dispersive Incoherent OFDR. *IEEE Photonics Technology Letters*, v. 28, n. 10, p. 1154–1156, May 2016. Citado na página [4](#).

CULSHAW, B.; KERSEY, A. Fiber-optic sensing: A historical perspective. *Journal of lightwave technology*, IEEE, v. 26, n. 9, p. 1064–1078, 2008. Citado na página 9.

FARAHANI, M. A.; GOGOLLA, T. Spontaneous Raman scattering in optical fibers with modulated probe light for distributed temperature Raman remote sensing. *Journal of Lightwave Technology*, IEEE, v. 17, n. 8, p. 1379, 1999. Citado 7 vezes nas páginas 7, 8, 10, 13, 16, 19 e 20.

FERREIRA, L. et al. Implementation of a fiber Bragg grating sensor network for structural monitoring of a new stone bridge. In: *Proceedings of the 3rd International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management-Bridge Maintenance, Safety, Management, Life-Cycle Performance and Cost*. [S.l.: s.n.], 2006. Citado na página 4.

FRIEBELE, E. J. Fiber Bragg grating strain sensors: present and future applications in smart structures. *Optics and Photonics News*, Optical Society of America, v. 9, n. 8, p. 33, 1998. Citado na página 4.

FUTURE-MARKET-INSIGHTS. *Distributed Fibre Optic Sensor Market: North America Continues to be the Largest Market*. 2016. Disponível em: <<http://www.newson6.com/story/33459667/distributed-fibre-optic-sensor-market-north-america-continues-to-be-the-largest-market>>. Acesso em: 14 nov. 2016. Citado 2 vezes nas páginas 2 e 3.

GIESEN, N. V. D. et al. Double-ended calibration of fiber-optic Raman spectra distributed temperature sensing data. *Sensors*, Molecular Diversity Preservation International, v. 12, n. 5, p. 5471–5485, 2012. Citado na página 9.

GIRARDI, G. Regularização de não Conformidades Técnicas em Instalações Elétricas em Áreas Classificadas. *Repositório de relatórios-Engenharia Elétrica*, n. 1, 2016. Citado na página 1.

GNAUCK, A. H.; JOPSON, R. M.; WINZER, P. J. Demonstration of Counter-Propagating Raman Pump Placed Near Signal-Channel Wavelengths. *IEEE Photonics Technology Letters*, v. 29, n. 1, p. 154–157, Jan 2017. Citado na página 15.

GOLDBARG, M. C.; LUNA, H. P. L. *Otimização combinatória e programação linear: modelos e algoritmos*. [S.l.]: Elsevier, 2005. v. 2. Citado 2 vezes nas páginas 12 e 13.

HARRELL, C.; GHOSH, B. K.; BOWDEN, R. O. Simulation using promodel. Boston: McGraw-Hil, 2011. Citado na página 26.

HILGERSOM, K. et al. Practical considerations for enhanced-resolution coil-wrapped Distributed Temperature Sensing. 2016. Citado 2 vezes nas páginas 1 e 4.

IEEE. Guide for Temperature Monitoring of Cable Systems. *IEEE Std 1718-2012*, p. 1–35, June 2012. Citado 5 vezes nas páginas 1, 10, 11, 16 e 20.

JAIN, R. Performance analysis of FDDI token ring networks: Effect of parameters and guidelines for setting TTRT. *LTS*, IEEE, v. 2, n. 2, p. 16–22, 1991. Citado na página 26.

JORDÃO, D. d. M. *Manual de Instalações Elétricas em: Indústrias Químicas, Petroquímicas e de Petróleo*. [S.l.]: Qualitymark Editora Ltda, 2002. Citado na página 1.

- KARAMEHMEDOVIC, E. *Incoherent optical frequency domain reflectometry for distributed thermal sensing*. Tese (Doutorado) — Technical University of Denmark, Department of Communications, Optics and Materials, 2006. Citado 9 vezes nas páginas 6, 7, 8, 9, 15, 16, 17, 20 e 22.
- KEISER, G. *Comunicações por Fibras Ópticas*. [S.l.]: AMGH Editora, 2014. Citado na página 22.
- LAAROSSA, I. et al. High-temperature distributed sensor based on Raman and multimode standard telecom fiber. In: OPTICAL SOCIETY OF AMERICA. *Novel Optical Materials and Applications*. [S.l.], 2016. Citado 3 vezes nas páginas 1, 4 e 22.
- LAW, A. M. How to build valid and credible simulation models. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE. *Proceedings of the 40th Conference on Winter Simulation*. [S.l.], 2008. p. 39–47. Citado na página 26.
- LEAL, F. et al. A practical guide for operational validation of discrete simulation models. *Pesquisa Operacional*, SciELO Brasil, v. 31, n. 1, p. 57–77, 2011. Citado na página 26.
- LEANDRO, D.; SOTO, V. deMiguel; LOPEZ-AMO, M. High-resolution Sensor System Using a Random Distributed Feedback Fiber Laser. *Journal of Lightwave Technology*, v. 34, n. 99, p. 1–1, 2016. Citado na página 4.
- LI, J.; XU, L.; KISHIDA, K. FBG-based positioning method for BOTDA sensing. *IEEE Sensors Journal*, v. 13, n. 99, p. 1–1, 2016. Citado na página 4.
- LIOS-TECHNOLOGY®. *Manuals, whitepapers*. 2016. Disponível em: <<http://www.lios-technology.com>>. Acesso em: 11 de nov. 2016. Citado na página 18.
- LOPEZ-GIL, A. et al. Simple Baseband Method for the Distributed Analysis of Brillouin Phase-Shift Spectra. *IEEE Photonics Technology Letters*, v. 28, n. 99, p. 1–1, 2016. Citado na página 4.
- MARIGNETTI, F. et al. Fiber Bragg Grating Sensor for Electric Field Measurement in the end Windings of High-Voltage Electric Machines. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 63, n. 5, p. 2796–2802, May 2016. Citado na página 4.
- MARQUES, C. A. F. et al. Aviation Fuel Gauging Sensor Utilizing Multiple Diaphragm Sensors Incorporating Polymer Optical Fiber Bragg Gratings. *IEEE Sensors Journal*, v. 16, n. 15, p. 6122–6129, Aug 2016. Citado na página 4.
- MARTINS, F. P.; AZEVEDO, J. A. P. A evolução do conceito de segurança intrínseca em áreas classificadas. In: IEEE. *Petroleum and Chemical Industry Conference-Brasil (PCIC Brasil)*. [S.l.], 2014. p. 213–220. Citado na página 1.
- MEDINA, A. C.; CHWIF, L. Modelagem e Simulação de Eventos Discretos: teoria & aplicações. 2ª Edição, São Paulo: Editora dos Autores, 2007. Citado na página 26.
- MUANENDA, Y. S. et al. Advanced Coding Techniques for Long-Range Raman/BOTDA Distributed Strain and Temperature Measurements. *Journal of Lightwave Technology*, IEEE, v. 34, n. 2, p. 342–350, 2016. Citado 3 vezes nas páginas xiii, 5 e 20.

- NEEHARIKA, V.; PATTNAIK, P. K. Optical MEMS Pressure Sensors Incorporating Dual Waveguide Bragg Gratings on Diaphragms. *IEEE Sensors Journal*, v. 16, n. 3, p. 681–687, Feb 2016. Citado na página 4.
- PEGDEN, C. D.; DAVIS, D. A. Arena: a SIMAN/Cinema-based hierarchical modeling system. In: ACM. *Proceedings of the 24th conference on Winter simulation*. [S.l.], 1992. p. 390–399. Citado na página 12.
- PRADHAN, H. S.; SAHU, P. K. Characterisation of Raman distributed temperature sensor using deconvolution algorithms. *Optoelectronics, IET*, v. 9, n. 2, p. 101–107, 2015. Citado 3 vezes nas páginas 4, 13 e 20.
- RESEARCH, T. M. Distributed Temperature Sensing (DTS) Market - Global Industry Analysis, Size, Share, Growth, Trends and Forecast 2016 - 2023. 2016. Citado 5 vezes nas páginas xiii, 1, 2, 3 e 4.
- RIBEIRO, L. A. *Espalhamento Raman em fibras ópticas com aplicação em sensores distribuídos de temperatura*. Tese (Doutorado) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia Espaciais/ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores, INPE, 2011. Citado 2 vezes nas páginas 6 e 7.
- RODRIGUES, A. D. G.; GALZERANI, J. C. Espectroscopias de infravermelho, Raman e de fotoluminescência: potencialidades e complementaridades. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 34, n. 4, p. 4309, 2012. Citado 2 vezes nas páginas 5 e 6.
- ROSSETTO, J. F.; FERREIRA, E. C. *Sensores Distribuídos Utilizando Efeitos não-Lineares em Fibras Ópticas para a Aplicação em Estruturas Inteligentes*. Tese (Doutorado) — FEEC/UNICAMP, 2004. Citado 3 vezes nas páginas 4, 10 e 22.
- ROTTWITT, K. et al. Scaling of the Raman gain coefficient: Applications to germanosilicate fibers. *Journal of lightwave technology*, IEEE, v. 21, n. 7, p. 1652, 2003. Citado 2 vezes nas páginas 6 e 15.
- SENIOR, J. M.; JAMRO, M. Y. *Optical fiber communications: principles and practice*. [S.l.]: Pearson Education, 2009. Citado na página 21.
- SHA-LU, Z. et al. Application research of distributed optical fiber Raman temperature sensor in the security of oil depot. In: IEEE. *Optoelectronics Global Conference (OGC)*, 2015. [S.l.], 2015. p. 1–4. Citado na página 4.
- SONG, K. Y. et al. Applications of Brillouin dynamic grating to distributed fiber sensors. *Journal of Lightwave Technology*, IEEE, 2016. Citado na página 6.
- SOTO, M. A. et al. High-performance Raman-based distributed fiber-optic sensing under a loop scheme using anti-stokes light only. *IEEE Photonics technology letters*, v. 23, n. EPFL-ARTICLE-182043, p. 534–536, 2011. Citado na página 9.
- SOTO, M. A. et al. Impact of loss variations on double-ended distributed temperature sensors based on Raman anti-stokes signal only. *Journal of Lightwave Technology*, IEEE, v. 30, n. 8, p. 1215–1222, 2012. Citado na página 20.
- SOUZA, A. C. Z. de; PINHEIRO, C. A. M. *Introdução à modelagem, análise e simulação de sistemas dinâmicos*. [S.l.]: Interciência, 2008. Citado na página 12.

SPERANDIO, V. M. *Um novo conceito de interrogação por padrões speckles para sensores de pressão aplicados na indústria de petróleo em áreas classificadas*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Espírito Santo, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, UFES, Vitória, 2015. Citado na página [1](#).

UDD, E.; SPILLMAN, W. The emergence of fiber optic sensor technology. *Fiber Optic Sensors: An Introduction for Engineers and Scientists*; Udd, E., Ed, p. 1–8, 2011. Citado na página [4](#).

UKIL, A.; BRAENDLE, H.; KRIPPNER, P. Distributed temperature sensing: review of technology and applications. *Sensors Journal*, IEEE, v. 12, n. 5, p. 885–892, 2012. Citado 4 vezes nas páginas [1](#), [4](#), [9](#) e [10](#).

WENG, Y.; WANG, T.; PAN, Z. Optimization of mode-dependent gain efficiency based on intermodal Raman scattering for few-mode distributed Raman amplifier. In: *Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO)*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 1–2. Citado na página [15](#).

YANG, B.; POTTER, A.; C, L. A simulation study of despatch bay performance in the steel processing industry. *European Journal of Operational Research*, North-Holland, v. 179, n. 2, p. 567, 2007. Citado na página [26](#).

Apêndices

APÊNDICE A – Parâmetros de Entrada

Tabela 2 – Valores Considerados nas Simulações

Parâmetro	Valor
Comprimento da Fibra	30 <i>m</i>
Potência da Fonte laser	100 <i>mW</i>
Tipo de Fibra	Monomodo
Domínio de análise	OFDR
Faixa de frequência de modulação	1 <i>KHz</i> - 10 <i>MHz</i>
Atenuação do sinal do laser	0,35 <i>dB/m</i>
Atenuação da componente AS	0,22 <i>dB/m</i>
Atenuação da componente S	0,21 <i>dB/m</i>
Coefficiente de captura da componente AS	4,00.10 ⁻¹⁰ <i>m</i> ⁻¹
Coefficiente de captura da componente S	3,04.10 ⁻¹⁰ <i>m</i> ⁻¹
Comprimento de onda da componente AS	1451 <i>nm</i>
Comprimento de onda da componente S	1663 <i>nm</i>
Número de amostras	4096
Diferença de energia entre fótons espalhados	50 <i>eV</i>
Temperatura de referência	300 <i>k</i>
Índice de refração na fibra	1,5
Responsividade do APD para a componente S	0,7 <i>A/W</i>
Responsividade do APD para a componente AS	0,8 <i>A/W</i>
Responsividade do fotodiodo PD	0,73 <i>A/W</i>
Fator de atenuação do sinal do laser	0,1
Fator de atenuação da componente AS	0,5
Fator de atenuação da componente S	0,5

APÊNDICE B – Valores para Simulação no Tanque de Petróleo

Tabela 3 – Valores para Simulação no Tanque de Petróleo.

Parâmetro	Valor
Comprimento da Fibra	6 <i>m</i>
Potência da Fonte laser	50 <i>mW</i>
Tipo de Fibra	Multimodo
Domínio de análise	OFDR
Faixa de frequência de modulação	10 <i>MHz</i> - 100 <i>MHz</i>
Atenuação do sinal do laser	0,35 <i>dB/m</i>
Atenuação da componente AS	0,50 <i>dB/m</i>
Atenuação da componente S	0,37 <i>dB/m</i>
Coeficiente de captura da componente AS	11,4.10 ⁻¹⁰ <i>m</i> ⁻¹
Coeficiente de captura da componente S	6,63.10 ⁻¹⁰ <i>m</i> ⁻¹
Comprimento de onda da componente AS	1451 <i>nm</i>
Comprimento de onda da componente S	1663 <i>nm</i>

APÊNDICE C – Produção Científica Decorrente da Dissertação

SILVA, L. C. B.; PONTES, M. J.; SEGATTO, M. E. V. Otimização de Parâmetros para Sensoriamento Óptico Distribuído de Temperatura. In: UFRGS. *Latin American Workshop on Optical Fiber Sensors (LAWOFS)*, Porto Alegre-RS. [S.l.], 2016. p. 1-6.

SILVA, Luís C. B.; PONTES, Maria J.; SEGATTO, Marcelo E. V.; "Efeitos não Lineares em Fibras com Aplicação em Sensoriamento Distribuído de Temperatura", p. 131-136 . In: Anais do VII Encontro Científico de Física Aplicada [=Blucher Physics Proceedings, v.3 n.1]. São Paulo: Blucher, 2016. ISSN 2358-2359, DOI 10.5151/phypro-vii-efa-031

SILVA, L. C. B.; PONTES, M. J.; SEGATTO, M. E. V. Analysis of Parameters for a Distributed Temperature Sensing based on Raman Scattering. *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications (JMOe)*, v. 16, n. 1, p. 259-272, 2017.

APÊNDICE D – Código em Matlab

```

1
2 % This script provides the main commands used in the simulations
3
4 % Amplitude of the component Anti-Stokes
5 Am_AS = (Po.*Pas.*gama_AS).*((exp(-a_ASef.*L)) ./ (a_ASef)) .* ...
6     (((sqrt(((cosh(2*a_ASef.*L - 1))/2) + ((1 - cos(2*k_mod.*L))/2)))) ...
7     ./ (sqrt(1 + (k_mod/a_ASef).^2)));
8
9 % Value in dBm
10 AS_dBm = 10*log10((real(Am_AS))/1E-3);
11
12 % Average value
13 Ame_AS = Po.*Pas.*gama_AS .* (1./(2*a_ASef)) .* (1-exp(-2*a_ASef.*L));
14
15 % Phase of component Anti-Stokes
16 fi_AS = -k_mod*L - atan(k_mod/a_ASef)+atan(tan(k_mod*L))/(tanh(a_ASef*L));
17
18 % Temperature calculation (first way)
19 T_AS = 1./((1./T(1))-(k/(h*c*v))*log(R_T./R_T(1)));
20
21 % Temperature calculation (Second way)
22 T = dE./(k*log((h_S_erro/h_AS_erro) * (Ras/Rs) * (aas/as) ...
23     * (1663e-9/1451e-9)^4*(exp(da*z))));
24
25 % Bose-Einstein probability distribution of phonons Stokes
26 Ps = 1./(1-exp(-dE./(T.*k)));
27
28 % Bose-Einstein probability distribution of phonons Anti-Stokes
29 Pas = exp(-dE./(T.*k))./(1-exp(-dE./(T.*k)));
30
31 % Laser power propagating in fiber
32 Pz = Ac.*(exp(-a_o.*z)).*(1 + m*cos(2*pi*fa*t)).*cos(2*pi*fc*t);
33
34 % Transfer function of component Anti-Stokes
35 H_AS = (Am_AS./Pz).*(exp(1j.*fi_AS));
36
37 % Pulse response of component Anti-Stokes
38 h_AS = ifft(abs(H_AS));

```